

变量泵控制变量马达系统建模及控制

王 岩

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 变量泵控制变量马达系统是一个双输入单输出耦合本质非线性系统, 常规控制方法很难取得满意的控制效果. 针对变量泵控制变量马达系统非线性和不可解耦的特点, 提出基于线性化理论的变量泵变量马达Bang-Bang控制算法. 首先建立变量泵控制变量马达系统数学模型, 模型存在包括输出变量在内的相乘非线性, 然后运用反馈线性化理论将非线性数学模型线性化, 最后提出新的Bang-Bang控制算法实现变量马达的快速控制. 仿真研究表明该算法可以实现系统快速控制, 效果优于目前常规控制方法, 而且算法对马达转速和负载变化都具有较强的鲁棒性.

关键词: 反馈线性化; Bang-Bang控制; 鲁棒性

中图分类号: TP271.3 **文献标识码:** A

Modeling and control for variable-pump controlling variable-motor

WANG Yan

(School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The variable-pump controlling variable-motor (VPCVM) is an essential nonlinear system with dual-input, single-output and coupling, for which regular control algorithms are ineffective to achieve the required control performances. Based on linearization theory for VPCVM, we propose an improved Bang-Bang control algorithm for tackling the nonlinearity and the unsolvable coupling. First we develop a mathematical model of VPCVM involving the multiplication nonlinearity with the output variable; and then, we linearize the model by using the feedback linearization theory. Based on the linearized model, we develop the improved Bang-Bang control algorithm to achieve the rapid control for VPCVM. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm realizes the desired rapid control on VPCVM with performances higher than that of conventional control methods. Furthermore, this algorithm exhibits a strong robustness against the variations of rotational speed and load.

Key words: feedback linearization; Bang-Bang control; robustness

1 引言(Introduction)

变量泵控制变量马达系统因具有效率高、调速范围宽等优点在大型采掘机械和部分工程机械中广泛应用, 在不考虑系统泄漏时, 马达转速为

$$\omega_m = \frac{q_p}{q_m} \omega_p, \quad (1)$$

式中: ω_m 为马达转速, ω_p 为变量泵转速, q_p 为变量泵排量, q_m 为变量马达排量.

由式(1)可以看出, 变量泵控制变量马达系统是一个双输入(变量泵排量和变量马达排量)单输出(变量马达转速)的双变量耦合本质非线性液压系统. 当 ω_p 一定时, 对于期望转速 ω_m 有无穷多组输入(q_p , q_m)满足要求, 控制量存在不确定性, 常规控制方法很难取得满意控制效果^[1].

目前变量泵控制变量马达系统有两种控制方法, 一是将变量泵控制变量马达系统分解为变量泵控制

定量马达和定量泵控制变量马达^[2-3], 这种控制方法降低了系统调速性能; 二是变量泵和变量马达转速同时控制, 文献[4-5]采用Takagi-Sugeno模糊算法实现变量泵变量马达系统控制, 但响应速度比较低.

近年来, 微分几何理论的发展推动了非线性系统的研究, 它在非线性系统的线性化与解耦控制中起到了重要作用^[6-7]. 文献[8]采用微分几何方法解耦, 运用反馈线性化方法对解耦后的系统进行线性化实现了磁浮列车搭接结构的非线性解耦控制; 文献[9]运用微分几何理论和状态反馈控制律实现了交流异步电动机运行控制模型的完全线性化和解耦控制. 变量泵控制变量马达系统是双输入、单输出非线性系统, 无法实现解耦, 但可以运用反馈线性化理论将其线性化, 为其他控制算法的引入提供可能.

针对本文控制系统存在包括输出变量在内的相乘非线性, 首先运用反馈线性化理论将马达转速表

达成变量泵控制电压和变量马达控制电压的线性组合;其次在不解耦情况下,根据Bang-Bang^[10-11]控制时间最优特点,提出新的Bang-Bang控制算法实现变量马达的快速控制.传统Bang-Bang控制器的输出仅取决于切换函数的正、负,新Bang-Bang控制器的输出不仅取决于切换函数的符号,而且还取决于控制量系数的正、负;最后通过仿真验证了控制算法的正确性和鲁棒性.

2 变量泵控制变量马达系统建模及线性化 (VPCVM model and linearization)

变量泵控制变量马达系统如图1所示.

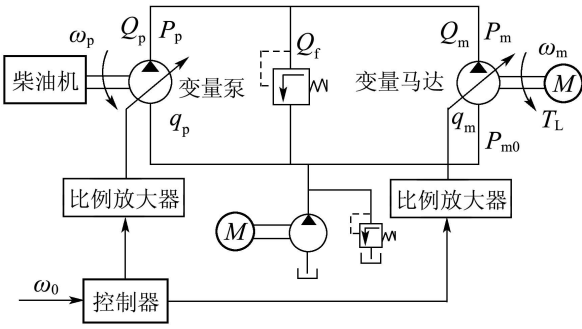


图1 变量泵控制变量马达原理

Fig. 1 The principle of VPCVM

2.1 变量泵控制变量马达系统建模(VPCVM model)

变量泵排量控制:

$$T_p \dot{q}_p + q_p = k_p u_p, \quad (2)$$

式中: T_p 为变量泵的时间常数, k_p 为变量泵的比例系数, u_p 为变量泵控制电压.

变量马达排量控制:

为了确保系统安全,马达的初始排量为全排量,最小排量为全排量的0.3倍,随着控制电压增加马达排量减小,因此马达实际排量为

$$q_m = q_{mmax} - q_{mk}, \quad (3)$$

式中: q_{mmax} 为变量马达全排量, q_{mk} 为变量马达控制排量.

$$T_m \dot{q}_{mk} + q_{mk} = k_m u_m, \quad (4)$$

式中: T_m 为变量马达的时间常数, k_m 为变量马达的比例系数, u_m 为变量马达控制电压.

变量泵流量方程:

$$Q_p = \omega_p q_p - C_{tp} P, \quad (5)$$

式中: Q_p 为变量泵的输出流量, C_{tp} 为变量泵的总泄漏系数, P 为变量泵高压腔压力.

液压马达的流量连续方程:

$$Q_p = C_{tm} P + q_m \omega_m + \frac{V_0}{\beta_e} \dot{P}, \quad (6)$$

式中: C_{tm} 为变量马达的总泄漏系数, V_0 为变量泵高压腔一侧的总容积, β_e 为液压油弹性模量.

马达的负载力矩平衡方程:

$$P q_m = J_t \dot{\omega}_m + B_t \omega_m + T_L, \quad (7)$$

式中: J_t 为负载转动惯量, B_t 为阻尼系数, T_L 为负载力矩.

联立式(2)–(7)得

$$\begin{cases} \dot{q}_p = -\frac{1}{T_p} q_p + \frac{k_p}{T_p} u_p, \\ \dot{q}_{mk} = -\frac{1}{T_m} q_{mk} + \frac{k_m}{T_m} u_m, \\ \dot{P} = -\frac{C_{t\beta_e}}{V_0} P - \frac{\beta_e}{V_0} (q_{mmax} - q_{mk}) \omega_m + \frac{\beta_e}{V_0} \omega_p q_p, \\ \dot{\omega}_m = -\frac{1}{J_t} (q_{mmax} - q_{mk}) P - \frac{B_t}{J_t} \omega_m - \frac{T_L}{J_t}. \end{cases} \quad (8)$$

令 $x_1 = q_p$, $x_2 = q_{mk}$, $x_3 = P$, $x_4 = \omega_m$, 则式(8)可以写为

$$\dot{x}_1 = -a_1 x_1 + b_1 u_p, \quad (9a)$$

$$\dot{x}_2 = -a_2 x_2 + b_2 u_m, \quad (9b)$$

$$\dot{x}_3 = -a_3 x_3 + a_4 x_2 x_4 - a_5 x_4 + a_6 x_1, \quad (9c)$$

$$\dot{x}_4 = a_7 x_3 - a_8 x_2 x_3 - a_9 x_4 - d, \quad (9d)$$

式中:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{T_p}, \quad b_1 = \frac{k_p}{T_p}, \quad a_2 = \frac{1}{T_m}, \\ b_2 &= \frac{k_m}{T_m}, \quad a_3 = \frac{C_{t\beta_e}}{V_0}, \quad a_4 = \frac{\beta_e}{V_0}, \\ a_5 &= \frac{\beta_e q_{mmax}}{V_0}, \quad a_6 = \frac{\beta_e \omega_p}{V_0}, \quad d = \frac{T_L}{J_t}, \\ a_7 &= \frac{q_{mmax}}{J_t}, \quad a_8 = \frac{1}{J_t}, \quad a_9 = \frac{B_t}{J_t}. \end{aligned}$$

由式(9)可以看出, 式(9c)(9d)中存在包括输出量 x_4 在内的相乘非线性, 变量泵控制变量马达是一个双输入 u_p 和 u_m 、单输出 ω_m 的本质非线性系统.

将式(9)改写为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + g_1(\mathbf{x}) u_p + g_2(\mathbf{x}) u_m, \quad (10)$$

式中: $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ 为系统的状态, $\mathbf{u} = [u_p \ u_m]^T$ 为系统输入,

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}) \ f_2(\mathbf{x}) \ f_3(\mathbf{x}) \ f_4(\mathbf{x})]^T,$$

$$f_1(\mathbf{x}) = -a_1 x_1, \quad f_2(\mathbf{x}) = -a_2 x_2,$$

$$f_3(\mathbf{x}) = -a_3 x_3 + a_4 x_2 x_4 - a_5 x_4 + a_6 x_1,$$

$$f_4(\mathbf{x}) = a_7x_3 - a_8x_2x_3 - a_9x_4 - d,$$

$$g_1 = [b_1 \ 0 \ 0 \ 0]^T, \quad g_2 = [0 \ b_2 \ 0 \ 0]^T.$$

系统输出:

$$y = h(\mathbf{x}) = x_4. \quad (11)$$

应用反馈线性化方法式(12)将式(10)进行线性化:

$$y_i^{(r_i)} = L_f^{r_i} h_i + \sum_{j=1}^p L_{g_j} (L_f^{r_i-1} h_i) u_j, \quad (12)$$

式(12)中, 符号 $L_f h(\mathbf{x})$ 表示 h 关于 f 的Lyapunov导数, 其定义为 $L_f h(\mathbf{x}) = \frac{\partial h}{\partial} f(\mathbf{x})$.

由

$$\begin{aligned} L_{g1}(L_f^0 h) &= 0, \quad L_{g2}(L_f^0 h) = 0, \\ L_{g1}(L_f^1 h) &= 0, \quad L_{g2}(L_f^1 h) = -a_8 b_2 x_3, \\ L_{g1}(L_f^2 h) &= (a_6 a_7 - a_6 a_8 x_2) b_1, \\ L_{g2}(L_f^2 h) &= (a_2 a_8 x_3 + a_4 a_7 x_4 + a_3 a_8 x_3 - \\ &\quad 2a_4 a_8 x_2 x_4 + a_5 a_8 x_4 - \\ &\quad a_6 a_8 x_1 + a_8 a_9 x_3) b_2. \end{aligned}$$

由式(12)得

$$y^{(3)} = F(\mathbf{x}) + G_1(\mathbf{x})u_p + G_2(\mathbf{x})u_m, \quad (13)$$

式中:

$$\begin{aligned} F(\mathbf{x}) &= L_f^3 h = \\ &A_1 f_1(\mathbf{x}) + A_2 f_2(\mathbf{x}) + A_3 f_3(\mathbf{x}) + A_4 f_4(\mathbf{x}), \\ A_1 &= a_6 a_7 - a_6 a_8 x_2, \\ A_2 &= a_2 a_3 x_3 + a_4 a_7 x_4 + a_3 a_8 x_4 - \\ &\quad 2a_4 a_8 x_2 x_4 + a_5 a_8 x_4 - a_6 a_8 x_1 + a_8 a_9 x_3, \\ A_3 &= a_2 a_8 x_2 - a_3 a_7 + a_3 a_8 x_2 - a_7 a_9 + a_8 a_9 x_2, \\ A_4 &= a_4 a_7 x_2 - a_5 a_7 - a_4 a_8 x_2^2 + a_5 a_8 x_2 + a_9^2, \\ G_1(\mathbf{x}) &= (a_6 a_7 - a_6 a_8 x_2) b_1, \\ G_2(\mathbf{x}) &= (a_2 a_8 x_3 + a_4 a_7 x_4 + a_3 a_8 x_3 - \\ &\quad 2a_4 a_8 x_2 x_4 + a_5 a_8 x_4 - \\ &\quad a_6 a_8 x_1 + a_8 a_9 x_3) b_2. \end{aligned}$$

由式(13)可以看出, 变量泵控制变量马达系统是一个双输入 u_p 和 u_m 、单输出 ω_m 的系统, 使用反馈线性化将其转化为线性关系, 通过控制 u_p 和 u_m 使系统的输出 y 满足要求。

3 变量泵控制变量马达 Bang-Bang 控制算法(Bang-Bang control for VPCVM)

线性化以后变量泵控制变量马达系统是一个双输入单输出不可解耦模型, 为了实现系统时间最优控制, 在不解耦情况下将Bang-Bang控制理论引入系统控制。

3.1 Bang-Bang 控制的原理(Principle of Bang-Bang control)

Bang-Bang控制又称时间最优控制, 设非线性时变系统的状态方程由下列微分方程描述^[12]:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = f[\mathbf{x}(t), u(t), t]. \quad (14)$$

初始条件为 $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$.

目标集条件为 $S(t), \mathbf{x}(t) \in S(t)$.

性能指标为 $J(t) = \int_{t_0}^{t_f} 1 dt = t_f - t_0$.

控制 $u(t)$ 是受限的, 即 $|u(t)| \leq M$.

现在的问题是要求最优控制函数 $\hat{u}$, 使系统从 $\mathbf{x}_0$ 最快转移到终值状态 $\mathbf{x}_j$: $J(\hat{u}) \leq J(u), u \in \Omega$.

对象的状态方程(12)满足一定条件时, 受限控制 $u_j(t)$ 的最优解为

$$\hat{u} = \begin{cases} -M, & \hat{q}_j(t) > 0, \\ +M, & \hat{q}_j(t) < 0, \\ \Delta, & \hat{q}_j(t) = 0, \end{cases} \quad (15)$$

其中: $\hat{q}_j(t)$ 为开关函数, Δ 表示不确定。

3.2 变量泵变量马达系统 Bang-Bang 控制算法(Bang-Bang control for VPCVM)

根据式(13)和第3.1节Bang-Bang控制原理, 采用式(15)可以实现变量泵控制变量马达的时间最优控制, 也就是使系统响应最快^[10-11].

变量泵控制电压 $u_p \in [-M, +M]$, 变量马达控制电压 $u_m \in [-N, +N]$.

定义马达转速误差:

$$e = y_d - y, \quad (16)$$

式中: e 为马达转速误差; y_d 为马达期望转速。

取切换函数

$$q = e + c_1 \dot{e} + c_2 \ddot{e}, \quad (17)$$

式中 c_1, c_2 满足hurwitz条件。

根据Bang-Bang控制原理和式(13), 变量泵变量马达系统Bang-Bang控制算法思想如下:

1) 如果切换函数 $q > 0$, 则可以解释为系统输出 y 小于期望 y_d , 必须使 y 增大。

2) 要快速增大 y , 则必须快速增大 $y^{(1)}$; 要快速增大 $y^{(1)}$, 则必须快速增大 $y^{(2)}$; 要快速增大 $y^{(2)}$, 则必须快速增大 $y^{(3)}$; 要快速增大 $y^{(3)}$, 则必须使式(13)中的 $G_1(\mathbf{x})u_p > 0$ 和 $G_2(\mathbf{x})u_m > 0$ 。

3) 要使 $G_1(\mathbf{x})u_p > 0$, 有两种情况: 如果 $G_1(\mathbf{x}) > 0$, 则 $u_p = +M$; 如果 $G_1(\mathbf{x}) < 0$, 则 $u_p = -M$ 。

同理可以推导出其他情况, 如图2所示。

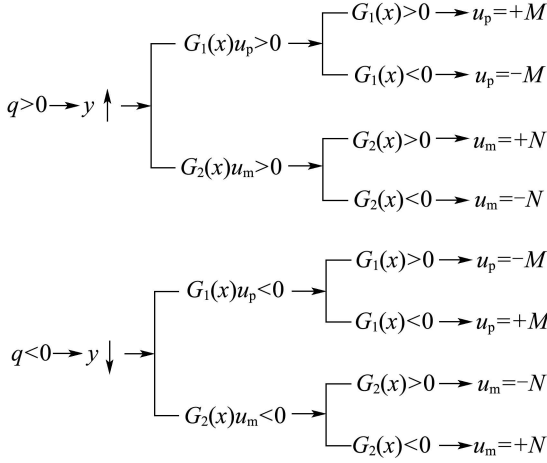


图2 变量泵控制变量马达Bang-Bang控制律

Fig. 2 Bang-Bang control law for VPCVM

根据图2得基于线性化理论的变量泵变量马达Bang-Bang控制律如表1所示.

表1 变量泵控制变量马达Bang-Bang控制律

Table 1 Bang-Bang control law for VPCVM

q	$G_1(x)$	u_p	$G_2(x)$	u_m
+	+	+M	+	+N
+	-	-M	-	-N
-	+	-M	+	-N
-	-	+M	-	+N
0	x	不变	x	不变

注: “+”表示大于零, “-”表示小于零, “x”表示不论何值, “不变”表示控制信号保持不变.

由表1可以看出, 在基于线性化理论的变量泵变量马达Bang-Bang控制算法中, 只需根据切换函数 q , $G_1(x)$ 和 $G_2(x)$ 的正负就可确定变量泵 u_p 和变量马达控制量 u_m , 避免出现引言中提到对于期望 ω_m 有无穷多组(u_p, u_m)问题, 且大大减少了算法的计算量.

传统Bang-Bang控制器的输出仅取决于切换函数 q 的正、负, 而新Bang-Bang控制器的输出不仅取决于切换函数的符号, 而且还取决于控制量系数 $G_1(x)$ 和 $G_2(x)$ 的正、负, 这是两者之间的不同, 也是本文解决多输入单输出系统快速性的创新点.

3.3 零动态分析(Analyse of zero-dynamics)

系统输出的李导数为:

$$\begin{aligned} L_{g1}(L_f^0 h) &= 0, L_{g2}(L_f^0 h) = 0; \\ L_{g1}(L_f^1 h) &= 0, L_{g2}(L_f^1 h) \neq 0; \\ L_{g1}(L_f^2 h) &\neq 0, L_{g2}(L_f^2 h) \neq 0. \end{aligned}$$

根据相对阶定义, 公式(9)描述的系统相对阶 $\gamma = 3$, 小于系统的相对维数 $n = 4$. 由伏柔贝尼斯定理可知: 存在 $n - \gamma = 1$ 个函数 $\xi(x)$, 使其满足 $L_g \xi(x) \leq$

$d\xi(x)$, $g \geq 0$, 且满足秩条件:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f h(x) \\ L_f^2 h(x) \\ \xi(x) \end{bmatrix} = 4, \quad (18)$$

求得一个解为

$$\xi(x) = x_3, \quad (19)$$

则当 $y = \dot{y} = \ddot{y} = 0$ 时, 系统零动态方程为

$$\dot{\xi} = \dot{x}_3 = -a_3 x_3 + a_6 x_1. \quad (20)$$

由式(9a)可以看出, x_1 是一个惯性环节, 根据第3.2节控制算法可知输入 u_p 有界, 则 x_1 有界.

由式(20)可以看出, ξ 也是一个惯性环节, 当 x_1 有界时, ξ 有界. 由此可以看出, 系统零动态稳定.

4 传统控制算法仿真研究(Traditional control law simulation)

变量泵控制变量马达系统, 采用上海柴油机股份有限公司的D6114ZG9B型柴油机, Linde公司型号为HPV75-02变量泵和型号为HVM105-02变量马达(注: 马达最大排量为全排量, 最小排量为0.3倍全排量). 系统参数:

$$T_p = 0.1 \text{ s}, k_p = 1.19 \times 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{rad} \cdot \text{V}),$$

$$T_m = 0.1 \text{ s}, k_m = 1.67 \times 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{rad} \cdot \text{V}),$$

$$u_p \in [0, 10], \beta_e = 1.4 \times 10^9 \text{ Pa},$$

$$C_t = 2 \times 10^{-11} \text{ m}^5/(\text{N} \cdot \text{s}),$$

$$B_t = 0.02 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}),$$

$$V_0 = 0.001 \text{ m}^3, \omega_p = 209.4 \text{ rad/s},$$

$$J_t = 0.343 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, u_m \in [0, 10].$$

工程机械中将变量泵控制变量马达系统分解为变量泵控制定量马达和定量泵控制变量马达两个阶段来控制, 为此传统控制算法分为3种形式, 即变量泵控制定量马达系统、定量泵控制变量马达系统和变量泵变量马达独立PID控制, 下面分别加以研究.

4.1 变量泵控制定量马达(Variable displacement pump control fixed displacement motor)

图1中马达为定量马达, 排量为60 cc/rev, 负载 $T_L = 50 \text{ N} \cdot \text{m}$, 变量泵采用PID控制, 控制参数为 $k_p = 0.0015$, $k_i = 0.0015$, $k_d = 0.0002$, 马达转速响应如图3所示, 在马达期望转速 $\omega_{mp} = 150 \text{ rad/s}$ 时, 系统超调量0.7%, 调节时间 $t_p = 0.75 \text{ s}$.

4.2 定量泵控制变量马达(Fixed displacement pump control variable displacement motor)

图1中泵采为全排量, 马达采用PID控制, 控制参数为 $k_p = 0.0002$, $k_i = 0.0008$, $k_d = 0.0001$, 负载

$T_L = 50 \text{ N} \cdot \text{m}$, 马达转速如图3所示, 在马达期望转速 $\omega_{mp} = 150 \text{ rad/s}$ 时, 系统超调量1.9%, 调节时间 $t_p = 0.82 \text{ s}$.

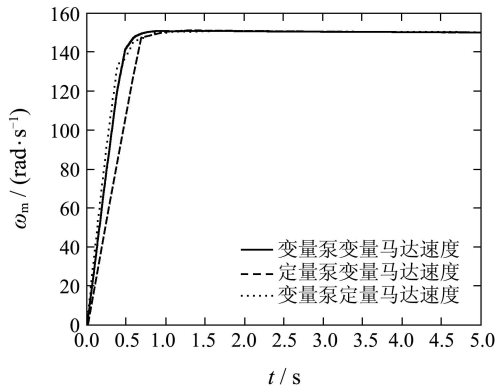


图3 传统算法下变量泵变量马达系统响应
Fig. 3 Motor speed of VPCVM controlled by traditional control law

4.3 变量泵变量马达独立PID控制(PID control for variable displacement pump and variable displacement motor)

图1中变量泵和变量马达控制, 采用PID控制算法, 负载 $T_L = 50 \text{ N} \cdot \text{m}$, 变量泵变量马达独立控制马达信号速度响应如图3所示, 系统超调量0.5%, 调节时间为0.631 s. 在马达期望转速 $\omega_{mp} = 150 \text{ rad/s}$ 时, 超调量0.5%, 调节时间 $t_{mp} = 0.631 \text{ s}$, 此时变量泵和变量马达排量如图4所示.

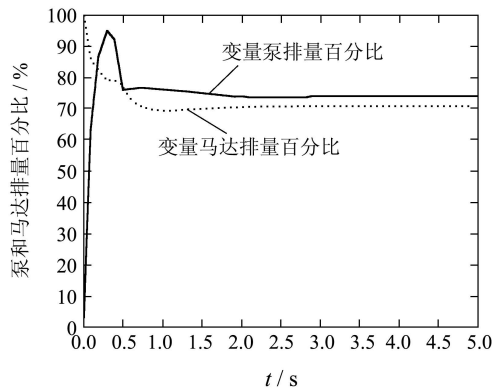


图4 变量泵变量马达独立控制排量百分比
Fig. 4 Pump and motor displacement percent

由图3可以看出 $t_{mp} < t_p < t_m$, 也就是说变量泵控制变量马达系统比变量泵控制定量马达系统或者定量泵控制变量马达系统响应速度快.

由图4可以看出, 变量泵和变量马达各自独立控制时在 $t \in [0.2, 0.5]$ 区间内存在排量耦合现象, 影响系统的响应速度.

5 基于新的Bang-Bang算法仿真(Simulation based on the new Bang-Bang)

根据第3部分新的Bang-Bang算法原理, 取式(17)

中的参数 $c_1 = 0.04$, $c_2 = 0.0001$ 进行仿真研究, 仿真分为两种情况, 即相同负载不同转速和相同转速不同负载.

5.1 相同负载不同转速仿真(Simulation under the same load and different speed)

当负载 $T_L = 50 \text{ N} \cdot \text{m}$, 马达期望转速为 $\omega_{m1} = 50 \text{ rad/s}$, $\omega_{m2} = 100 \text{ rad/s}$, $\omega_{m3} = 150 \text{ rad/s}$ 时, 在新Bang-Bang控制算法作用下系统响应如图5所示, 在 $\omega_{m3} = 150 \text{ rad/s}$ 时变量泵和变量马达排量百分比如图6所示.

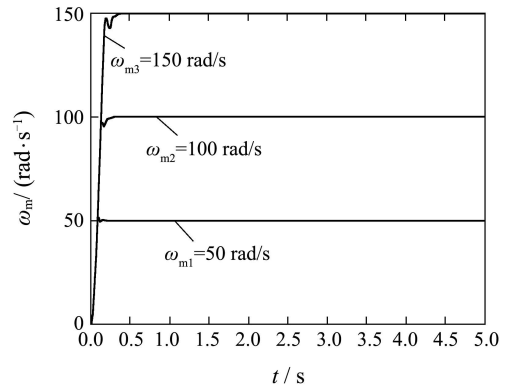


图5 相同负载不同转速仿真

Fig. 5 Simulation under the same load and different speed

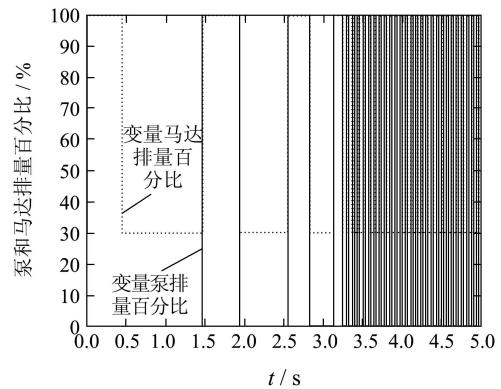


图6 转速150 rad/s时泵和马达排量百分比

Fig. 6 Pump and motor displacement percent at motor speed 150 rad/s

由图5可以看出, 采用新Bang-Bang控制器可以实现变量泵变量马达系统的控制, 在马达期望转速 $\omega_{m3} = 150 \text{ rad/s}$ 时, 系统调节时间 $t_{1s} = 0.275 \text{ s}$, 系统无超调量、无溢流. 同时, 可以实现马达期望转速 $\omega_{m1} = 50 \text{ rad/s}$, $\omega_{m2} = 100 \text{ rad/s}$ 和 $\omega_{m3} = 150 \text{ rad/s}$ 的控制, 且性能基本相同, 验证了基于反馈线性化Bang-Bang控制器具有较强的鲁棒性.

对比第4部分变量泵控制变量马达系统传统控制算法可以看出, 基于反馈线性化Bang-Bang控制器提高了系统响应速度, 减小了超调量, 算法具有明显优势.

由图6可以看出,变量泵排量要么是全排量,要么是零;变量马达要么是0.3倍全排量,要么是全排量。系统压力建立起来后,当泵是全排量时,马达为0.3倍全排量;当泵为零排量时,马达为全排量,根据式(1)可以看出,此时系统响应速度最快。

根据式(1)马达转速原理,对比图4和图6变量泵和变量马达控制信号,可以看出基于新的Bang-Bang算法变量泵变量马达控制较变量泵和变量马达独立控制具有明显优势,也揭示了新的Bang-Bang算法可以加快系统响应速度的原因。

5.2 相同转速不同负载仿真(Simulation under the same speed and different load)

采用新Bang-Bang控制器进行马达转速控制,马达期望转速 $\omega_m = 100 \text{ rad/s}$,外部负载分别为 $T_{L1} = 50 \text{ N} \cdot \text{m}$, $T_{L2} = 100 \text{ N} \cdot \text{m}$ 和 $T_{L3} = 150 \text{ N} \cdot \text{m}$,系统响应如图7所示。

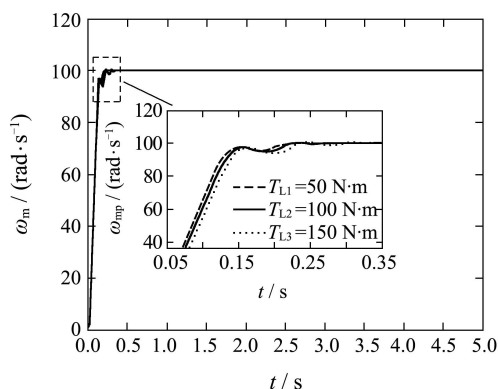


图7 相同转速不同负载仿真

Fig. 7 Simulation under the same speed and different load

由图7可以看出,对于马达期望转速 $\omega_m = 100 \text{ rad/s}$,当外部负载 $T_{L1} = 50 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,系统调节时间 $t_{1s} = 0.2 \text{ s}$,超调量 $\sigma_1 = 0.01\%$;当外部负载 $T_{L2} = 100 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,系统调节时间 $t_{2s} = 0.213 \text{ s}$,超调量 $\sigma_2 = 0.05\%$;当外部负载 $T_{L3} = 150 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,系统调节时间 $t_{3s} = 0.228 \text{ s}$,超调量 $\sigma_3 = 0.5\%$,仿真结果表明在负载大范围内变化时系统性能基本不变,说明基于线性化理论变量泵控制变量马达Bang-Bang控制算法具有较强鲁棒性。

6 结论(Conclusion)

通过对变量泵控制变量马达系统的研究,得出以下3点结论: 1) 变量泵控制变量马达系统是一个双输入单输出的本质非线性系统,可以运用反馈线性化理论进行线性化,但由于其是单输出系统所以不能解耦; 2) 基于反馈线性化理论的变量泵变量马达Bang-Bang控制算法可以实现系统快速控制,对转速及负载变化的有较强鲁棒性,而且算法简单、计算量小; 3) 传统Bang-Bang控制器的输出仅取决于切换函数 q 的正、负,而新Bang-Bang控制器的输出不仅取决于切换函数的符号,而且还取决于控制量系

数 $G_1(x)$ 和 $G_2(x)$ 的正、负,该算法对多输入单输出系统控制具有借鉴作用。

参考文献(References):

- [1] 王岩, 付永领, 牛建军. 变量泵—变量马达自适应控制算法研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(10): 1173–1179.
(WANG Yan, FU Yongling, NIU Jianjun. Adaptive control algorithm for variable pump-variable motor system[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(10): 1173–1179.)
- [2] SANELIUS M. *On complex hydrostatic transmissions*[D]. Link ping, Sweden: Link Ping Studies and Technology, 1999.
- [3] 万丽荣, 赵胜刚, 沈潇, 等. 基于MATLAB/SIMULINK的变量泵变量马达调速系统动态仿真[J]. 煤矿机械, 2007, 8(2): 26–28
(WAN Lirong, ZHAO Shenggang, SHEN Xiao, et al. Dynamic simulation of variable displacement pump variable displacement motor volume speed-modulating system based on MATLAB/SIMULINK[J]. *Coal Mine Machinery*, 2007, 8(2): 26–28.)
- [4] SCHULTE H. LMI-based observer design on a power-split continuously variable transmission for off-road vehicles[C] // *2010 IEEE International Conference on Control Applications*. Yokohama, Japan: IEEE Control Systems Society, 2010: 713–718.
- [5] SCHULTE H, GERLAND P. Observer design using T-S fuzzy systems for pressure estimation in hydrostatic transmissions[C] // *Proceedings of 2009 the 9th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*. Washington: IEEE Computer Society, 2009: 779–784.
- [6] KAZMIERKOWSKI M P, SOBCZUK D L. High performance induction motor control via feedback linearization[C] // *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Piscataway, NJ: IEEE, 1995: 633–638.
- [7] PAYAM F A. Robust speed sensorless control of doubly-fed induction machine based input-output feedback linearization control using a sliding-mode observer[C] // *International Conference on Power Electronics Drives and Energy Systems for Industrial Growth*. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 1–5.
- [8] 刘恒坤, 郝阿明, 常文森. 磁浮列车搭接结构的非线性解耦控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(8): 899–902.
(LIU Hengkun, HAO Aming, CHANG Wensen. Nonlinear decoupling control of the join-structure in a maglev train[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(8): 899–902.)
- [9] 王文涛, 刘学佳. 基于反馈线性化理论的异步电动机解耦控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2009, 31(1): 22–25.
(WANG Wentao, LIU Xuejia. Decoupling control of asynchronous based on feedback linearization theory[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2009, 31(1): 22–25.)
- [10] 张强, 冯树兴, 岳巍强. 基于神经网络的大容积环境温度模拟系统的控制策略[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(3): 429–432.
(ZHANG Qiang, FENG Shuxing, YUE Weiqiang. Control strategy of large volume temperature simulating system based on neural networks[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(3): 429–432.)
- [11] 丁青青, 王赞基. 时间最优控制算法及其在SVC控制中的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(4): 442–445.
(DING Qingqing, WANG Zanji. Optimal-time controller for a control system of non-linear SVC power systems[J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2004, 44(4): 442–445.)
- [12] 王占林. 近代液压控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
(WANG Zhanlin. *Modern Hydraulic Control*[M]. Beijing: China Machine Press, 1997.)

作者简介:

王岩 (1975—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为伺服系统控制等,
E-mail: wybuaa@buaa.edu.cn.