变量泵控制变量马达系统变结构控制算法

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的速度调节过程相当于变量泵控制定量马达或定量泵控制变量马达，存在系统溢流损失大、调节速度慢和没有发挥系统潜能等缺点.为了克服这些不足，提出基于反馈线性化理论的变量泵变量马达系统变结构控制算法.建立变量泵控制变量马达系统数学模型，并针对系统的相乘非线性，运用精确反馈线性化理论将其线性化；根据该闭式液压系统双变量调速的特点，利用变量马达期望转速和马达排量计算变量泵排量；运用变结构算法进行变量马达转速控制，并进行算法的 Lyapunov 稳定性证明.仿真表明，基于本控制策略可有效地提高系统的响应速度、减小超调量，而且算法具有较强的鲁棒性.

关 键 词：反馈线性化；变结构；相乘非线性

中图分类号：V 227.83

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)12-1453-04

Variable structure control for variable pump controlling variable motor

Wang Yan

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

Abstract: Variable structure control for variable pump controlling variable motor (VPCVM) systems based on feedback linearization was presented to overcome the defects, such as huge overflow losses, slow speed regulating and poor full capacity utilization, arisen from the conventional independent control of variable pump or variable motor in the systems. The mathematical model of VPCVM was established, and the multiplicative nonlinear property existing in the system caused trouble for the motor speed controlling. To improve the VPCVM performance, the VPCVM nonlinear model was transformed into a linear system by feedback linearization. For the closed hydraulic speed controlling system with double-variable, the variable pump displacement can be deduced from motor expected speed and variable motor displacement. The variable structure controller was designed to control variable motor speed and its stability was proved according to Lyapunov theory. Simulations show that our approach has the capacity for speeding up system response and reducing overshoot of VPCVM system, and features with robust performance.

Key words: feedback linearization; variable structure control; multiplicative nonlinear

部分工程机械采用变量泵控制变量马达容积调速系统，系统的工作过程相当于变量泵控制定量马达或定量泵控制变量马达[1-2].在速度调节过程中只有一个(变量泵或者变量马达)变量机构工作，存在3个问题，①转速调节过程中溢流损失大；②系统响应慢；③没有发挥变量泵控制变量马达系统潜能.如何克服这些不足具有工程应用前景，且针对该类双变量耦合调速的液压系统，研究有效的控制策略也是一种有益的尝试.

变量泵控制变量马达是一个双输入单输出的本质非线性系统，采用普通比例积分微分控制器很难取得令人满意的控制效果[3].从国内、外资料可以看出，对变量泵控制变量马达系统研究很少.针对液压系统本质非线性问题，文献[4]提出基于Lyapunov稳定理论，应用“反演”技术设计非线性液压伺服系统控制器，但其主要针对液压系统参

收稿日期：2009-10-19

基金项目：高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20091102120038)

作者简介：王 岩(1975—)，男，江苏宿迁人，讲师，wybuaa@buaa.edu.cn.

数不确定性;文献[5－6]利用反馈线性化实现了液压系统相乘非线性控制问题,但没有考虑系统输入之间的联系.

针对变量泵控制变量马达系统特点,本文提出基于反馈线性化理论的变量泵变量马达系统变结构控制算法.首先使用反馈线性化理论将变量泵控制变量马达系统的非线性模型线性化;其次根据变量马达期望转速和马达排量计算变量泵排量,实现系统输入降维,简化线性化过程、减小计算量;最后设计变结构控制器进行变量马达转速控制,并对算法的 Lyapunov 稳定给出理论证明,仿真研究验证了算法的可行性和有效性.

1 问题提出及建模

变量泵控制变量马达系统如图 1 所示,系统输入为变量泵和变量马达的控制电压,输出为马达转速.

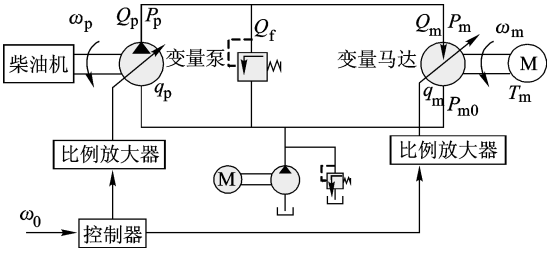

图 1 变量泵控制变量马达系统原理图

建立系统数学模型如式(1)所示:

$$\dot{x}_1 = -a_1 x_1 + b_1 u_p \tag{1a}$$

$$\dot{x}_2 = -a_2 x_2 + b_2 u_m \tag{1b}$$

$$\dot{x}_3 = -a_3 x_3 + a_4 x_2 x_4 - a_5 x_4 + a_6 x_1 \tag{1c}$$

$$\dot{x}_4 = a_7 x_3 - a_8 x_2 x_3 - a_9 x_4 - d \tag{1d}$$

系统输出:

$$y = \omega_m(t) = x_4 \tag{2}$$

式中,$x_1(t)=q_p(t)$;$x_2(t)=q_{mk}(t)$;$x_3(t)=P(t)$;$x_4(t)=\omega_m(t)$;$a_1=1/T_p$;$b_1=k_p/T_p$;$a_2=1/T_m$;$b_2=k_m/T_m$;$a_3=C_t\beta_e/V_0$;$a_4=\beta_e/V_0$;$a_5=\beta_e q_{m\,max}/V_0$;$a_6=\beta_e\omega_p/V_0$;$a_8=1/J_t$;$a_7=q_{m\,max}/J_t$;$a_9=B_t/J_t$;$d=T_L/J_t$;$T_p$ 为泵的时间常数;q_p 为泵的排量;k_p 为泵的比例系数;u_p 为变量泵控制电压;q_m 为马达实际排量;$q_{m\,max}$为马达全排量;q_{mk}为马达控制排量;T_m 为马达的时间常数;k_m 为马达的比例系数;u_m 为变量马达控制电压;Q_p 为泵的输出流量;ω_p 为泵的转速;C_{tp}为泵的总泄漏系数;P 为高压腔压力;C_{tm}为液压马达的总泄漏系数;q_m 为液压马达排量;ω_m 为液压马达转速;V_0 为高压腔一侧的总容积;β_e 为液压油弹性模量;J_t 为负载转动惯量;B_t 为阻尼系数;T_L 为负载力矩.

由式(1)可以看出,式(1c)和式(1d)中存在相乘非线性,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.

2 系统模型精确反馈线性化

反馈线性化是利用代数变换将一个非线性系统的动态特性变换成线性的动态特性,是一种全局线性化的方法,不但可以简化控制器的设计,而且控制器可以保证全局稳定[7-8].

2.1 系统模型精确反馈线性化

根据反馈线性化理论将式(1)线性化得

$$y^{(2)} = F(\boldsymbol{x}) + G(\boldsymbol{x})u_m \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{x}=[x_1,x_2,x_3,x_4]^T$

$$F(\boldsymbol{x}) = -a_8 x_3 f_2(\boldsymbol{x}) + (a_7 - a_8 x_2) f_3(\boldsymbol{x}) - a_9 f_4(\boldsymbol{x})$$

$$G(\boldsymbol{x}) = -a_8 b_2 x_3$$

$$f_1(\boldsymbol{x}) = -a_1 x_1$$

$$f_2(\boldsymbol{x}) = -a_2 x_2$$

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

$$f_4(\boldsymbol{x}) = a_7 x_3 - a_8 x_2 x_3 - a_9 x_4 - d$$

由式(3)可以看出,$y^{(2)}$ 中变量马达控制信号 u_m 显式,而变量泵控制信号 u_p 还是隐性.

对式(3)有 2 种处理方法,①根据反馈线性化理论计算得到 u_m 和 u_p 显式;②根据式(3)进行系统局部线性化计算 u_m,u_p 通过其他途径求取.本文采用第 2 种方法,具有简化控制算法计算量、提高算法实时性的优点.

取系统的控制输入 u_m 为

$$u_m = \frac{1}{G(\boldsymbol{x})}(-F(\boldsymbol{x}) + v) \tag{4}$$

则系统输出:

$$y^{(2)} = \omega_m^{(2)} = v \tag{5}$$

从而实现输入输出的线性化,根据系统性能要求,由式(4)和式(5)即可求得马达排量 u_m.

2.2 变量泵排量计算

对于变量泵控制变量马达闭式系统来说,泵的出口流量等于马达入口流量,对于马达期望转速 ω_d 有

$$\omega_p q_p \eta_x = \omega_d q_m \tag{6}$$

式中,η_x 为闭式系统容积效率;ω_d 为液压马达期望转速.

由式(1)和式(6)得

$$u_p = \frac{q_{m\,max} - k_m u_m}{k_p \cdot \eta_x} \cdot \frac{\omega_d}{\omega_p} \tag{7}$$

3　变量马达变结构控制算法

对于输入输出线性化的系统,采用变结构控制,利用变结构与被控对象参数和扰动无关的性质来抑制干扰和负载的变化.

取滑模面为

$$s=\dot{e}+c_1e+c_2\int e\mathrm{d}t \tag{8}$$

式中,$e=\omega_m-\omega_d$;c_1,c_2 满足 hurwitz 条件.

3.1　等效滑模控制器设计

由式(8)求导得

$$\dot{s}=\ddot{e}+c_1\dot{e}+c_2e=\ddot{\omega}_m-\ddot{\omega}_d+c_1\dot{e}+c_2e \tag{9}$$

将式(5)代入式(9)得

$$\dot{s}=v-\ddot{\omega}_d+c_1\dot{e}+c_2e=0$$

等效控制器为

$$v_{eq}=\ddot{\omega}_d-c_1\dot{e}-c_2e \tag{10}$$

3.2　滑模控制器设计

为了满足滑模到达条件 $s\dot{s}\leqslant-\eta|s|$,其中$\eta>0$ 必须采用切换控制.

切换控制器设计为

$$v_{sw}=-\eta\mathrm{sgn}(s) \tag{11}$$

滑模控制器为

$$v=v_{eq}+v_{sw}=\ddot{\omega}_d-c_1\dot{e}-c_2e-\eta\mathrm{sgn}(s) \tag{12}$$

3.3　控制器稳定性证明

取 Lyapunov 函数为

$$V=\frac{1}{2}s^2 \tag{13}$$

则

$$\dot{V}=s\cdot\dot{s}=s(v-\ddot{\omega}_d+c_1\dot{e}+c_2e) \tag{14}$$

将式(12)代入式(14)得

$$\dot{V}=-\eta s\cdot\mathrm{sgn}(s)=-\eta|s|<0 \tag{15}$$

由于 $V\cdot\dot{V}<0$,所以系统稳定.

4　滑模变结构的抖动处理

由滑模控制律式(12)可以看出,变结构切换系数 η 与系统的抖动有直接关系,η 越大系统切换能量越大、同时系统的抖动也越大.为了兼顾系统响应速度和减少系统抖动,根据切换函数 s 的大小决定 η 大小,但 η 不能太小,否则会影响系统的鲁棒性和快速性.

采用模糊控制算法计算 η,模糊控制的输入为切换函数 s.

1) 定义模糊集:

Z=零;PS=正小;PM=正中;PB=正大

2) 根据模糊控制器原理,$|s|$为模糊控制器的输入,η 为模糊控制器的输出.

$$|s|=\{Z,PS,PM,PB\}$$

$$\eta=\{Z,PS,PM,PB\}$$

3) 确定模糊滑模控制器的模糊规则

为了兼顾系统的响应速度和减少系统抖动,模糊控制规则如表 1 所示.

使用模糊规则是:If $|s|$ is A, then η is B.

表 1　模糊控制规则表

$\|s\|$	Z	PS	PM	PB
η	Z	PS	PM	PB

4) 反模糊化

采用重心法将模糊输出精确化,精确化后模糊控制器输出为 $\overline{\eta}$.

由式(4)和式(12)得变量马达控制律:

$$u_m=\frac{1}{G(x)}\Delta \tag{16}$$

式中 $\Delta=(\dot{\omega}_d-F(x)-c_1\dot{e}-c_2e-\overline{\eta}\,\mathrm{sgn}(s))$

由式(7)和式(16)得变量泵控制律:

$$u_p=\frac{q_{m\,max}\cdot\omega_d}{k_p\omega_p\eta_x}-\frac{k_m\omega_d}{k_p\omega_p\eta_xG(x)}\cdot\Delta \tag{17}$$

5　仿真研究

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 HMV105-02 变量马达.系统参数 $T_p=0.1$ s,$k_p=1.19\times10^{-6}$ m^3/(rad·V),$T_m=0.1$ s,$k_m=1.67\times10^{-6}$ m^3/(rad·V),$\beta_e=1.4\times10^9$ Pa,$C_t=2\times10^{-11}$ m^5/(N·s),$B_t=0.02$ (N·m·s)/rad,$V_0=0.001$ m^3,$\omega_p=209.4$ rad/s,$J_t=0.343$ kg·m^2.

5.1　相同负载不同转速仿真

负载 $T_L=150$ N·m,马达期望转速为 $\omega_{d1}=100$ rad/s 和 $\omega_{d2}=10$ rad/s,式(8)中的 $c_1=5$,$c_2=1$,系统响应如图 2 所示.

由图 2 可以看出,采用反馈线性化变结构控制器可以实现变量泵变量马达的控制,在马达期望转速 $\omega_{d1}=100$ rad/s 时,系统调节时间 $t_{1s}=0.3418$ s,超调量 $\sigma_1=1.35\%$,系统无溢流.对比文献[3]可以看出,变结构控制算法提高了系统响应速度、减小了超调量,具有明显优势.

由图 2 可以看出,采用同一反馈线性化变结构控制器可以实现马达期望转速 $\omega_{d1}=100$ rad/s 和 $\omega_{d2}=10$ rad/s 的控制,且两者性能基本相同,

说明反馈线性化变结构控制器具有较强的鲁棒性.

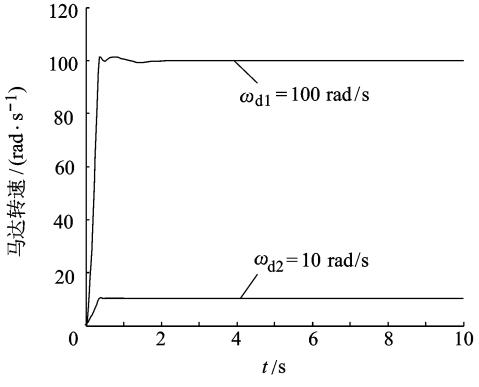

图2 马达系统速度响应

5.2 相同转速不同负载仿真

采用反馈线性化变结构控制器进行马达转速控制,马达期望转速 $\omega_{d1}=100$ rad/s,外部负载分别为 $T_{L1}=50$ N·m 和 $T_{L2}=150$ N·m 系统响应如图3所示.

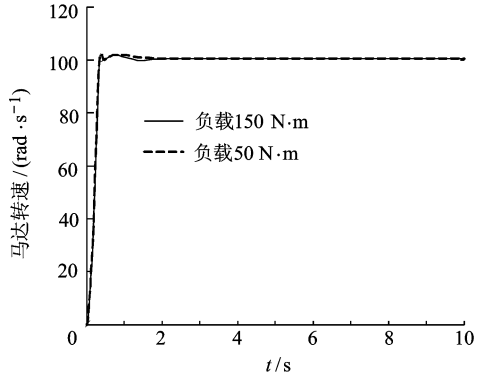

图3 相同转速不同负载系统响应

由图3可以看出,对于马达期望转速 $\omega_{d1}=100$ rad/s,当外部负载 $T_{L1}=50$ N·m 时,系统调节时间 $t_{1s}=0.3408$ s,超调量 $\sigma_1=1.43\%$;当外部负载 $T_{L2}=150$ N·m 时,系统调节时间 $t_{1s}=0.3419$ s,超调量 $\sigma_1=1.35\%$,结果表明反馈线性化变结构控制器对负载也具有较强的鲁棒性.

6 结束语

通过变量泵控制变量马达系统研究,得出如下结论:

1) 变量泵控制变量马达系统是本质非线性系统,存在相乘非线性;

2) 使用精确反馈线性化可以实现变量泵控制变量马达系统的非线性模型线性化,运用变结构控制算法提高了系统性能;

3) 变量泵控制变量马达系统是双输入单输出系统,通过分析将其转化为单输入单输出系统,简化了线性化过程和控制器设计;

4) 仿真表明反馈线性化变结构控制器具有较强的鲁棒性,在期望转速和负载大范围变化时系统控制性能基本不变.

参考文献(References)

[1] 马鹏飞.全液压推土机液压行驶驱动系统动力学研究[D].西安:长安大学工程机械学院,2006
Ma Pengfei. Study on hydraulic bulldozers moving hydraulic driving system dynamics [D]. Xi'an: School of Construction Machinery, Chang'an University, 2006(in Chinese)

[2] 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, 28(2): 26-28(in Chinese)

[3] 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(in Chinese)

[4] 曾克俭.非线性液压伺服系统的自适应控制[J].机械工程与自动化,2007(1):102-104
Zeng Kejian. Adaptive control of nonlinear hydraulic servo-systems [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2007(1): 102-104(in Chinese)

[5] 白国长,祈晓野,王占林.具有相乘非线性的马达速度鲁棒控制[J].北京航空航天大学学报,2008,34(7):803-806
Bai Guochang, Qi Xiaoye, Wang Zhanlin. Motor speed robust control with multiplying nonlinear property [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(7): 803-806(in Chinese)

[6] 孙卫华,裘丽华,祈晓野,等.电液复合系统中的相乘非线性控制[J].北京航空航天大学学报,2005,31(5):489-493
Sun Weihua, Qiu Lihua, Qi Xiaoye, et al. Multiplying nonlinear control in electrohydraulic compound system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(5): 489-493(in Chinese)

[7] Kaddouri A, Akhrif O, Le Huy H, et al. Nonlinear feedback control of a permanent magnet synchronous motors [J]. Canada Conf Electrical and Computer Engineering, 1994(5): 77-80

[8] Liu T H, Wang K L, Chen C G. A novel two degree of freedom controller design for a permanent magnet linear synchronous motor control system [J]. International Journal of Electronics, 2003, 90(1): 167-183

(编 辑:张 嵘)