具有相乘非线性的马达速度鲁棒控制

白国长 祁晓野 王占林

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100191)

摘 要：变转速变排量联合控制是一种新型的容积控制，具有效率高和相对快的响应，但由于具有相乘的本质非线性，给控制带来一定的难度. 针对变频调速变排量联合控制的泵控马达速度试验系统，建立了系统的数学模型，对存在的本质非线性问题，提出采用精确反馈线性化方法进行线性化处理，并设计了基于积分滑模面的马达速度滑模变结构控制器. 由于系统参数多，各个参数是变化的且不易确定，造成常规的滑模变结构控制输出抖振现象严重，为降低输出抖振现象，提出采用自适应模糊滑模控制器进行改进，并对稳定性进行证明. 最后对该控制方法的抗干扰性和正弦信号跟踪性进行了仿真试验，仿真结果验证了所设计的控制方法正确性.

关 键 词：精确反馈线性化；滑模变结构控制；转速排量联合控制；本质非线性

中图分类号：V 227.83

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)07-0803-04

Motor speed robust control with multiplying nonlinear property

Bai Guochang Qi Xiaoye Wang Zhanlin

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

Abstract: The control method that combined variable speed and variable displacement is a new type of cubage control. It has the advantages of high efficiency and relative fast response. But its multiplicative essential nonlinear property causes trouble to control. To the pump controlled motor speed system with frequency inverter and variable displacement, its mathematical model was established. To the problem of essential nonlinear property, the exact feedback linearization method was put forward in the linear process, and the motor speed sliding mode control(SMC) with integral sliding surface was designed. Considering the system with multiple parameter, the parameters were variable and difficult to be determined. All this leaded to the more chatting phenomenon in the output. to debase it, the adaptive fuzzy SMC was used to improve it, and its stability was proved. The anti disturb ability and sinusoidal track ability simulation were done. The simulation results show the validity of this control method.

Key words: exact feedback linearization; sliding mode control(SMC); speed and displacement combined control; essence nonlinear property

容积调速回路利用变量机构的位置控制作用，改变泵或马达的排量来调节执行元件的运动速度. 没有溢流损失和节流损失，效率较高，适用于大功率系统. 但是传统的容积调速回路存在一些缺点：响应特性明显低于阀控系统，在需要高响应的场合受到限制；斜盘的摆角只能局限在一定的范围，因此调速范围有限；电机转速固定，因而小流量时泵仍作高速运转，磨损与噪声状态得不到应有的改善；电机效率随负载而变化，在轻载时效率很低.

液压变频调速是利用变频器，通过改变泵的转速，在泵的排量不变的情况下改变泵源的输出

收稿日期：2007-06-20

作者简介：白国长(1968—)，男，河南许昌人，博士后，bai_guochang@126.com. 现工作于郑州大学机械工程学院.

流量,进而改变执行机构如马达或液压缸的速度.相对于传统的容积控制,其效率更高,且没有变量机构故障率高的缺点,但由于电机磁饱和现象,转子转动惯量大,存在响应速度更低的缺点.

若在改变排量的同时改变转速,可以解决或减轻上述问题,但由于存在着转速和排量相乘的本质非线性,给控制带来许多问题,本文研究利用精确反馈线性化的方法进行线性化处理,并采用变结构的控制方法进行控制.

1 系统数学模型的建立

实验室联合控制的泵马达试验系统,采用矢量控制变频驱动变量泵.对试验系统建立数学模型,如图1所示[1],图中各参数含义见文献[1].对该模型进行适当简化,见图2,取状态变量:

$$x_1(t)=q_p(t) \qquad x_2(t)=\omega(t)$$
$$x_3(t)=p_m(t) \qquad x_4(t)=\omega_m(t)$$

则系统状态微分方程为

$$\dot{x}_1=-a_1x_1+b_1u \tag{1a}$$
$$\dot{x}_2=-a_2x_2+b_2u \tag{1b}$$
$$\dot{x}_3=a_3x_1x_2-a_4x_3-a_5x_4 \tag{1c}$$
$$\dot{x}_4=a_6x_3 \tag{1d}$$
$$a_1=1/T_p \qquad a_2=1/T_d$$
$$a_3=\beta_e/V_0 \qquad a_4=C_{lpm}\beta_e/V_0$$
$$a_5=q_m\beta_e/V_0 \qquad a_6=q_m/J_m$$
$$b_1=K_p/T_p \qquad b_2=iK_d/T_d$$

式(1c)中存在状态变量 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的乘积,为本质非线性,需采用非线性控制方法进行控制.

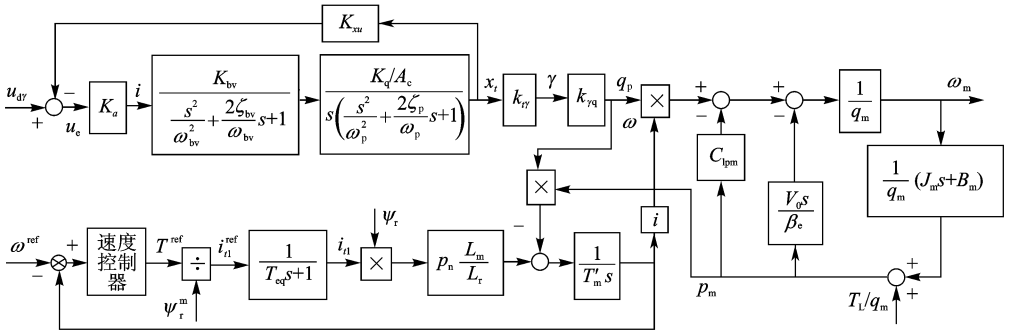


图1 变频调速变排量联合控制的马达速度系统

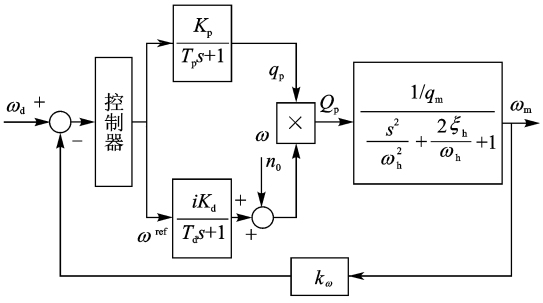


图2 简化后的变转速变排量联合控制的马达速度系统

2 精确反馈线性化

对于单输入单输出非线性控制系统,通过非线性状态变换和输入变换,可以使一类非线性系统的状态或输出/输入实现线性化.考虑如下单输入单输出非线性控制系统:

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}&=f(\boldsymbol{x})+g(\boldsymbol{x})u\\ \boldsymbol{y}&=h(\boldsymbol{x})\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

为了研究输入输出间的动态响应关系,对 $\boldsymbol{y}$ 关于 t 求导,直到 $\boldsymbol{y}$ 的导数项中第1次出现控制输入量 u:

$$\boldsymbol{y}^{(r)}=\frac{\partial^r h}{\partial \boldsymbol{x}^r}f(\boldsymbol{x})+\frac{\partial^r h}{\partial \boldsymbol{x}^r}g(\boldsymbol{x})u=$$
$$L_f^r h(\boldsymbol{x})+L_gL_f^{r-1}h(\boldsymbol{x})u \tag{3}$$

其中,$L_fh(\boldsymbol{x}):\mathbf{R}^n\to\mathbf{R}$ 和 $L_gh(\boldsymbol{x}):\mathbf{R}^n\to\mathbf{R}$ 分别表示 h 对向量场 f 和对向量场 g 的李导数,并且满足:

$$L_f^r h(\boldsymbol{x})=L_f(L_f^{r-1}h(\boldsymbol{x})) \tag{4}$$

如果 $L_gL_f^{r-1}h(\boldsymbol{x})$ 对于所有 $\boldsymbol{x}$ 都有界且不等于0,则称非线性系统具有相对阶 r,并可以通过

$$u=\frac{1}{L_gL_f^{r-1}h(\boldsymbol{x})}(-L_f^r h(\boldsymbol{x})+v)=$$
$$\alpha(\boldsymbol{x})+\beta(\boldsymbol{x})v \tag{5}$$

得到输出 $\boldsymbol{y}$ 对新输入 v 的线性方程:

$$\boldsymbol{y}^{(r)}=v \tag{6}$$

由式(1d),对 $\boldsymbol{x}$ 连续2次求导,并把式(1a)~式(1c)代入得

$$x_4^{(3)}=a_6(a_3\dot{x}_1x_2+a_3x_1\dot{x}_2-a_4\dot{x}_3-a_5\dot{x}_4)$$
$$f_1(\boldsymbol{x})+g_1(\boldsymbol{x})u \tag{7}$$

式中 $g_1(\boldsymbol{x})=(b_1x_2+b_2x_1)a_3a_6$

$$f_1(\boldsymbol{x})=(-a_1-a_2-a_4)a_3a_6x_1x_2+$$
$$a_6(a_4^2+a_5a_6)x_3+a_4a_5a_6x_4$$

若取系统的控制输入为

$$u=\frac{1}{g_1(\boldsymbol{x})}(-f_1(\boldsymbol{x})+v) \tag{8}$$
$$\omega_m^{(3)}=x_4^{(3)}=v \tag{9}$$

从而实现马达速度控制系统的输入输出线性化.

3　变结构控制

3.1　滑模面的选取与输出确定

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

$$s=e^{(2)}+\alpha_1\dot{e}+\alpha_2 e+\alpha_3\int e\mathrm{d}t \tag{10}$$

式中,$e=\omega_{\mathrm{m}}-\omega_{\mathrm{d}}$. $\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3$ 满足 hurwitz 条件.

可以证明,当取

$$v=\omega_{\mathrm{d}}^{(3)}-\alpha_1\ddot{e}-\alpha_2\dot{e}-\alpha_3 e-l\,\mathrm{sgn}\,s \tag{11}$$

时系统是稳定的. $l>0$ 是切换项系数.

证明　取 Lyapunov 函数为

$$V=\frac{1}{2}s^2 \tag{12}$$

由式(11)代入(9)得

$$\omega_{\mathrm{m}}^{(3)}=\omega_{\mathrm{d}}^{(3)}-\alpha_1\ddot{e}-\alpha_2\dot{e}-\alpha_3 e-l\,\mathrm{sgn}\,s$$

$$\dot{s}=e^{(3)}+\alpha_1\ddot{e}+\alpha_2\dot{e}+\alpha_3 e=$$

$$(\omega_{\mathrm{m}}^{(3)}-\omega_{\mathrm{d}}^{(3)})+\alpha_1\ddot{e}+\alpha_2\dot{e}+\alpha_3 e=-l\,\mathrm{sgn}\,s$$

$$\dot{V}=s\dot{s}=-sl\,\mathrm{sgn}\,s=-l\mid s\mid<0 \tag{13}$$

故稳定. **证毕**

所以,得到的速度控制律为

$$u=\frac{1}{g_1(\boldsymbol{x})}(-f_1(x)+\omega_{\mathrm{d}}^{(3)}-\alpha_1\ddot{e}-\alpha_2\dot{e}-\alpha_3 e-l\,\mathrm{sgn}\,s) \tag{14}$$

求 $f_1(\boldsymbol{x}),g_1(\boldsymbol{x})$需要知道各个变量及系数的值,不易准确获得,控制式(14)很难实现,故采用自适应的模糊系统逼近,即自适应模糊滑模变结构控制.

3.2　自适应模糊滑模变结构控制设计

1) 模糊系统设计[2]

由 IF-THEN 形式的模糊系统,采用乘积推理机、单值模糊器和中心平均解模糊器,则模糊系统的输出为

$$\boldsymbol{y}(\boldsymbol{x})=\frac{\sum_{j=1}^{m}y^j\left(\prod_{i=1}^{n}\mu_{A_i^j}(x_i)\right)}{\sum_{j=1}^{m}\left(\prod_{i=1}^{n}\mu_{A_i^j}(x_i)\right)} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{y}(\boldsymbol{x})=\boldsymbol{\theta}^{\mathrm{T}}\xi(\boldsymbol{x}) \tag{16}$$

其中　$\boldsymbol{\theta}=[y^1,y^2,\cdots,y^m]^{\mathrm{T}}$

$$\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{x})=[\xi_1(\boldsymbol{x}),\xi_2(\boldsymbol{x}),\cdots,\xi_m(\boldsymbol{x})]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{x})=\frac{\prod_{i=1}^{n}\mu_{A_i^j}(x_i)}{\sum_{j=1}^{m}\left(\prod_{i=1}^{n}\mu_{A_i^j}(x_i)\right)}$$

2) 自适应模糊滑模控制器的设计

在实际应用中,由于 f 和 g 往往未知,为使系统稳定,往往把变结构控制的输出项设计较大,加剧变结构控制的输出抖振现象,为降低抖振,采用模糊系统逼近 f 和 g,即: $\hat{f}(\boldsymbol{x}\mid\boldsymbol{\theta}_f)=\boldsymbol{\theta}_f^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{x})$, $\hat{g}(\boldsymbol{x}\mid\boldsymbol{\theta}_g)=\boldsymbol{\theta}_g^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{x})$. $\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{x})$为模糊向量,参数 $\boldsymbol{\theta}_f^{\mathrm{T}}$ 和 $\boldsymbol{\theta}_g^{\mathrm{T}}$ 根据自适应律而变化,设计自适应律为

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_f=-r_1 s\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{x}) \tag{17}$$

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_g=-r_2 s\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{x})u \tag{18}$$

下面证明其稳定性.

证明　设最优参数为

$$\boldsymbol{\theta}_f^*=\arg\min_{\boldsymbol{\theta}_f\in\Omega_f}\left[\sup_{x\in\mathbf{R}^n}\mid\hat{f}\left(\boldsymbol{x}\mid\boldsymbol{\theta}_f\right)-f(\boldsymbol{x},t)\mid\right] \tag{19}$$

$$\boldsymbol{\theta}_g^*=\arg\min_{\boldsymbol{\theta}_g\in\Omega_g}\left[\sup_{x\in\mathbf{R}^n}\mid\hat{g}\left(\boldsymbol{x}\mid\boldsymbol{\theta}_g\right)-g(\boldsymbol{x},t)\mid\right] \tag{20}$$

其中 Ω_f 和 Ω_g 分别为 $\boldsymbol{\theta}_f$ 和 $\boldsymbol{\theta}_g$ 的集合.

定义最小逼近误差为

$$w=f(\boldsymbol{x},t)-\hat{f}(\boldsymbol{x}\mid\boldsymbol{\theta}_f^*)+(g(\boldsymbol{x},t)-\hat{g}(\boldsymbol{x}\mid\boldsymbol{\theta}_g^*))u \tag{21}$$

$$\dot{s}=e^{(3)}+\alpha_1\ddot{e}+\alpha_2\dot{e}+\alpha_3 e=$$

$$\alpha_1\ddot{e}+\alpha_2\dot{e}+\alpha_3 e+f_1(\boldsymbol{x})+g_1(\boldsymbol{x})u-\omega_{\mathrm{d}}^{(3)}=$$

$$f_1(\boldsymbol{x})+g_1(\boldsymbol{x})u-\xi_1(\boldsymbol{x},t)=$$

$$f(\boldsymbol{x},t)+[g(\boldsymbol{x},t)+\hat{g}(\boldsymbol{x},t)-\hat{g}(\boldsymbol{x},t)]u-\xi_1(\boldsymbol{x},t)=$$

$$[f(\boldsymbol{x},t)-\hat{f}(\boldsymbol{x},t)]+[g(\boldsymbol{x},t)-\hat{g}(\boldsymbol{x},t)]u+\xi_1(\boldsymbol{x},t)-l\,\mathrm{sgn}\,s-\xi_1(\boldsymbol{x},t)=$$

$$[f(\boldsymbol{x},t)-\hat{f}(\boldsymbol{x},t)]+[g(\boldsymbol{x},t)-\hat{g}(\boldsymbol{x},t)]u-l\,\mathrm{sgn}\,s$$

由式(21)得

$$\dot{s}=\hat{f}^*(\boldsymbol{x},t)-\hat{f}(\boldsymbol{x},t)+(\hat{g}^*(\boldsymbol{x},t)-\hat{g}(\boldsymbol{x},t))u-l\,\mathrm{sgn}\,s+w=$$

$$\boldsymbol{\varphi}_f^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{x})+\boldsymbol{\varphi}_g^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{x})u(t)-l\,\mathrm{sgn}\,s+w \tag{22}$$

其中

$$\boldsymbol{\varphi}_f=\boldsymbol{\theta}_f-\boldsymbol{\theta}_f^*$$

$$\boldsymbol{\varphi}_g=\boldsymbol{\theta}_g-\boldsymbol{\theta}_g^*$$

$$\hat{f}^*(\boldsymbol{x},t)=\hat{f}^*(\boldsymbol{x}\mid\boldsymbol{\theta}_f^*)$$

$$\hat{g}^*(\boldsymbol{x},t)=\hat{g}^*(\boldsymbol{x}\mid\boldsymbol{\theta}_g^*)$$

定义 Lyapunov 函数为

$$V=\frac{1}{2}\left(s^2+\frac{1}{\gamma_1}\boldsymbol{\varphi}_f^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}_f+\frac{1}{\gamma_2}\boldsymbol{\varphi}_g^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}_g\right) \tag{23}$$

$$\dot{V}=s\dot{s}+\frac{1}{\gamma_1}\boldsymbol{\varphi}_f^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{\varphi}}_f+\frac{1}{\gamma^2}\boldsymbol{\varphi}_g^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{\varphi}}_g=$$

$$s(\boldsymbol{\varphi}_f^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{x})+\boldsymbol{\varphi}_g^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{x})u(t)-l\,\mathrm{sgn}\,s+w)+$$

$$\frac{1}{\gamma_1}\boldsymbol{\varphi}_f^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{\varphi}}_f+\frac{1}{\gamma_2}\boldsymbol{\varphi}_g^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{\varphi}}_g=$$

$$\frac{1}{r_1}\boldsymbol{\varphi}_f^{\mathrm{T}}(\gamma_1 s\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{x})+\dot{\boldsymbol{\varphi}}_f)+$$

$$\frac{1}{r_2}\boldsymbol{\varphi}_g^{\mathrm{T}}(\gamma_2 s\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{x})u(t)+\dot{\boldsymbol{\varphi}}_g)-l\mid s\mid+sw$$

其中 $\dot{\boldsymbol{\varphi}}_f=\dot{\boldsymbol{\theta}}_f \qquad \dot{\boldsymbol{\varphi}}_g=\dot{\boldsymbol{\theta}}_g$

将式(19)式(20)代入,得 $\dot{V}=-l|s|+sw$,由于 w 非常小,故 $\dot{V}\leqslant 0$,所以稳定. **证毕**

4 仿真试验

对实验室的试验系统,通过建立数学模型,用MATLAB仿真软件进行仿真研究,当采用变转速变排量联合控制时,能加快系统的响应速度,这在文献[3-4]中已有研究,故这里不再作仿真研究.这里对采用自适应模糊滑模控制时验证其抗干扰性.用于逼近 f 和 g 的模糊规则分别有25条,自适应参数 $\gamma_1=10,\gamma_2=3$.所用的参数:给定的输入信号为300 r/min,马达的负载转矩 $1\,200+35\sin 2t$ (N·m),相当于马达额定负载转矩的70%,并在20%上下浮动,其响应曲线见图3,2条曲线基本重合,且在上述干扰的作用下速度响应曲线无明显变化.

当给定的信号为 $600+100\sin t$ 时,其速度跟踪曲线见图4,2条曲线也基本上是重合的.说明自适应模糊滑模变结构控制良好的适应性能.

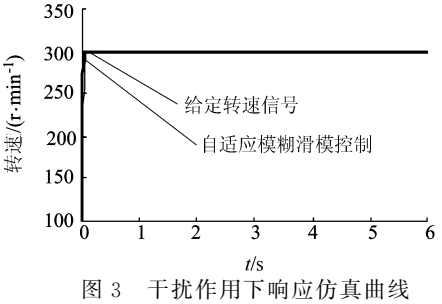


图3 干扰作用下响应仿真曲线

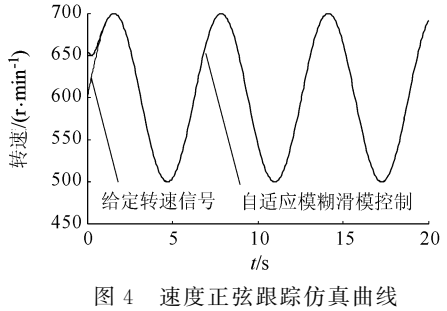


图4 速度正弦跟踪仿真曲线

对于参数摄动的影响这里不做仿真研究,由变结构控制的原理得到保证[3].

5 结 论

对于转速排量联合控制的系统,由于本质上的非线性,故一般的控制方法难以奏效.本文提出的采用反馈线性化方法把它转换为线性系统,采用滑模变结构进行控制,并采用自适应模糊滑模变结构控制进行改进,经仿真验证在负载变化时速度恒定且有很好的跟踪性能,具有很好的控制效果.

参考文献(References)

[1] 王占林.近代液压控制[M].北京:机械工业出版社,1997
Wang Zhanlin. Modern hydraulic servo control[M]. Beijing: China Machine Press,1997(in Chinese)

[2] 刘金琨.滑模变结构控制MATLAB仿真[M].北京:清华大学出版社,2005:40-225
Liu Jinkun. SMC MATLAB simulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2005:40-225(in Chinese)

[3] 魏鹏,王占林,裘丽华.针对飞机机载作动系统的滑模模糊变结构控制[J].清华大学学报,2006,46(8):1393-1396
Wei Peng, Wang Zhanlin, Qiu Lihua. Fuzzy variable structure control for aircraft control system[J]. Journal of Tsinghua University,2006,46(8)1393-1396(in Chinese)

[4] 白国长,王占林.变频调速—变量泵复合调节液压系统仿真研究[J].系统仿真学报,2006,18(2):424-426
Bai Guochang, Wang Zhanlin. Simulation and study of composite hydraulic system with frequency control and variable pump[J] Journal of System Simulation,2006,18(2):424-426(in Chinese)

[5] 方一鸣,王乐,王益群.考虑电枢反应非线性的直流电机速度控制研究[J].电气传动自动化,2003,25(1):29-31
Fang Yiming, Wang Le, Wang Yiqun. The study of DC motor speed control considering the nonlinear of armature reaction[J]. Electric Drive Automation,2003,25(1):29-31(in Chinese)

[6] Ibbini M S, Zakaria W S. Nonlinear control of DC machines [J]. Electric Machines and Power Systems, 1996, 24(1):21-35

[7] Horng J H. Neural adaptive tracking control of DC motor [J]. Information Science, 1999,118(1):1-13

[9] 孙卫华,裘丽华,祁晓野,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)

(责任编辑:赵海容)