

# 泵控式带钢纠偏伺服系统动态特性研究

南 海

(山西太钢不锈钢股份有限公司 不锈钢热轧厂,山西 太原 030003)

**摘 要:**常用的带钢纠偏系统为阀控缸电液伺服系统,存在维修成本高、系统发热量大、故障率高等问题。论文提出采用直驱式电液伺服系统代替带钢纠偏系统中的阀控式电液伺服系统,采用永磁式同步电动机代替电液伺服阀作为带钢纠偏控制系统的控制元件,设计出了永磁式同步电动机驱动定量泵直接控制液压缸的电液伺服控制系统,利用 Matlab/Simulink 仿真分析系统的稳定性和动态特性,结果表明,该系统满足带钢纠偏控制对稳定性、响应快速性的要求。

**关键词:**带钢纠偏;泵控缸;系统仿真

**中图分类号:**TH137

**文献标识码:**A

**文章编号:**1008-0813(2014)05-0074-03

## Dynamic Characteristics Research of Strip Guiding Servo System with Pump-Controlled Cylinder

NAN Hai

(Stainless Steel Hot-rolled Strip Plant of Shanxi Taigang Stainless Steel Co., Ltd., Taiyuan 030003, China)

**Abstract:** The frequently-used strip guiding system is valve-controlled cylinder electro-hydraulic servo (EHS) system, which has the following existing problems, namely, high maintenance cost, large calorific value and high failure rate etc. This paper presents that the valve-controlled EHS system in strip guiding system can be replaced by the directly-driven EHS system, and permanent-magnet synchronous motor (PMSM) can replace electric-hydraulic servo valve to be the control elements in strip guiding system. Meanwhile, the paper designs EHS system in which the proportional pump driven by PMSM can directly control hydraulic cylinder and analyzes the stability and dynamic characteristics of this system by Matlab/Simulink simulation, the result of which shows that the system bears the advantages of being stable and having speedy response which are required by strip guiding system.

**Key words:** strip guiding system; pump-controlled cylinder; system simulation

## 0 引言

带钢纠偏系统用于对带钢卷取对边控制,广泛应用于在轧钢或带钢热处理等连续生产线中。在带钢的连续轧制过程中,由于带钢厚度不均、浪形及横向弯曲、辊子偏心或有锥度、张力不适或张力波动较大等诸多原因,会造成带钢跑偏现象,致使带钢卷取不整齐,增加带边的剪切量消耗,造成不必要的浪费,因此必须对带钢卷取的跑偏进行纠偏控制<sup>[1]</sup>。传统的带钢纠偏控制系统一般采用电液伺服阀控制纠偏液压缸伺服技术,核心控制元件为电液伺服阀。通常采用比例控制技术,电液伺服阀的比例电磁铁在接受到纠偏控制信号后,驱动阀芯运动,输出相应成比例的流量和压力,驱动纠偏液压缸做相应的运动。伺服阀具有极快的响应速度和很高的控制精度,用它构成的电液伺服控制系统,具

有精度高、频响快等优良控制特性,但是同时具有对油液污染敏感、发热量大、维护困难、装机成本高等固有缺陷。为了从根本上解决上述问题,理想途径是采用直接泵控技术,应用泵控原理,不仅可较阀控系统提高能量效率 40% 以上,减少系统发热,降低装机成本,而且可实现用导线代替钢管传递动力的分布式智能控制,是实现液压控制技术绿色化的理想途径<sup>[2]</sup>。

本文针对带钢纠偏系统提出用变转速定量泵缸系统代替传统伺服阀控缸系统,其特点是,用一个蓄能器通过两个单向阀对液压缸两腔预压紧和补充液压缸的泄漏,用永磁式同步电动机驱动定量泵控制液压缸的运动速度和方向。在分析系统原理的基础上,建立系统的数学模型,利用 Matlab 下的 Simulink 模块进行物理建模,利用仿真的手段研究分析系统的动态特性。

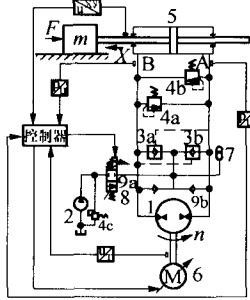
## 1 系统原理

泵控缸系统原理如图 1 所示,主要由永磁式同步电动机、双向定量液压泵、对称液压缸、液控单向阀、蓄

收稿日期:2013-08-29

作者简介:南海(1970-),男,山西太原人,工程师,学士,主要从事轧钢技术与不锈钢产品研发。

能器和溢流阀等组成,控制系统所需的位移、速度信号由光电传感器检测并实时反馈给控制器,液压缸两腔的压力由压力传感器检测。控制器根据各种反馈量计算后,输出控制信号调节永磁式同步电动机的转速、转向及电磁换向阀的通断。



1-双向定量液压泵 2-辅助泵 3a、3b-液控单向阀  
4a、4b、4c-溢流阀 5-对称液压缸 6-永磁式同步电动机  
7-蓄能器 8-电磁换向阀 9a、9b-单向阀

图1 变速定量泵控缸液压系统原理图

当电磁阀8得电时,低压蓄能器通过两个单向阀对液压缸两腔预压紧并对蓄能器补充液体,这样就提高了泵控系统的固有频率和负载刚性,使系统具有与阀控原理类似的特性,同时也向两侧油路中补充流量,虽然执行机构是对称缸,两个工作腔没有容积差,但液压缸和液压泵肯定有内泄漏和外泄漏,因此泵控液压系统的补油油路不可缺少。

## 2 系统数学模型

### 2.1 永磁式同步电动机数学模型

假设磁路不饱和、不计磁滞和涡流损耗影响,空间磁场呈正弦分布,采用转子磁链定向控制,则永磁式同步电动机在同步旋转坐标系下的数学模型如下<sup>[3]</sup>:

(1)电压方程。

$$u_d = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - n_p \omega_m Li_q \quad (1)$$

$$u_q = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + n_p \omega_m Li_d + n_p \omega_m \psi_r \quad (2)$$

式中  $u_d$ 、 $u_q$ 、 $i_d$ 、 $i_q$ ——分别为旋转坐标系下的定子电压、电流;

$R$ ——定子电阻;

$L$ ——定子电感;

$\omega_m$ ——转子角速度;

$n_p$ ——极对数;

$\psi_r$ ——永磁体产生的磁链。

(2)电动机输出的转矩方程。

$$T_e = 3n_p \psi_r i_q / 2 \quad (3)$$

式中  $T_e$ ——电磁转矩。

(3)系统转矩平衡方程。

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B_f \omega_m \quad (4)$$

式中  $T_L$ ——负载转矩;

$B_f$ ——转动阻尼系数;

$J$ ——折合到电机主轴上的转动惯量。

### 2.2 泵控缸系统数学模型

假设液压缸上的负载为惯性负载,不计管路、阀的泄漏及沿程压力损失,蓄能器压力为恒压,油液温度和弹性模量不变。

定量泵的流量方程为:

$$q_L = D_p \omega_m - C_{ip}(p_A - p_B) \quad (5)$$

式中  $q_L$ ——定量泵的流量;

$D_p$ ——定量泵的几何排量;

$C_{ip}$ ——定量泵的总泄漏系数;

$p_A$ ——定量泵A口压力;

$p_B$ ——定量泵B口压力。

对称液压缸的流量连续性方程:

$$q_L = A_p \frac{dx}{dt} + C_{tp} p_L + \frac{V_t}{4\beta_e} \frac{dp_L}{dt} \quad (6)$$

式中  $A_p$ ——液压缸有效面积;

$x$ ——活塞位移;

$C_{tp}$ ——液压缸总泄漏系数;

$p_L$ ——液压缸两腔压力差,  $p_L = p_A - p_B$ ;

$V_t$ ——液压缸两腔总容积,包含管路容积;

$\beta_e$ ——液体弹性模量。

活塞动态力平衡方程为:

$$A_p p_L = M_t \frac{d^2 x}{dt^2} + B_p \frac{dx}{dt} + F_L \quad (7)$$

式中  $M_t$ ——活塞和负载折算到活塞上的总质量;

$B_p$ ——活塞和负载折算到活塞上的总粘性阻尼系数;

$F_L$ ——作用在活塞上的外负载力。

### 2.3 永磁式同步电动机直驱定量泵控缸系统传递函数

对公式(1)~(7)线性化、拉普拉斯变换并整理,可得永磁式同步电动机直驱泵控缸系统传递函数框图,如图2所示。

图中  $K_L$  为液压缸输出力到电动机转轴力矩的转换系数。将系统参数代入方框图,可在 Matlab/Simulink 软件环境下搭建系统仿真模型,就可对系统进行仿真研究并最终确定最优控制参数。

## 3 仿真研究

系统仿真模型如图3所示,系统参数如表1所示。

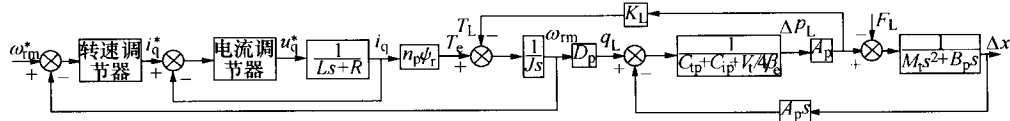


图 2 永磁式同步电动机直驱定量泵控液压缸传递函数框图

表 1 系统参数

纠偏	最大钢卷质量(kg)	23 000	额定功率(kW)	13
负载	卷取机座质量(kg)	20 000	永 额定转矩(N·m)	70
	卷取速度(m/s)	5	磁 额定转速(r/min)	2000
	摩擦系数	0.3	同 定子电阻(Ω)	0.215
液压	液压缸行程(cm)	15	步 定子电感(mH)	3.3
系统	液压缸有效面积(cm <sup>2</sup> )	200	电 永磁磁通(Wb)	0.816
	液压泵体积排量(mL/rev)	40	动 极对数	4
	液体体积弹性模量(N/m <sup>2</sup> )	1.4×10 <sup>9</sup>	机 转动惯量(kg·m <sup>2</sup> )	0.011

系统的液压回路是一个典型的容积调速闭式液压回路，其控制系统的核心部分是永磁式同步电动机及其控制系统，在 Matlab/Simulink 仿真软件中建立系统的仿真模型，如图 3 所示。根据系统参数，运行仿真模型，永磁式同步电动机的动态响应曲线如图 4 所示。从仿真结果可以看出，永磁同步电动机具有很好的动态响应速度，500r/min 响应时间约 0.01s；1000r/min 响应时间约 0.022s；1500r/min 响应时间是 0.032s；2000r/min 响应时间是 0.043s。永磁式同步电动机动态响应较快，基本没有超调。给定 100mm 阶跃信号，纠偏液压缸的位移响应曲线如图 5 所示，系统的响应时间为 1.5s，平均纠偏速度为 0.18m/s，快速性较好，无超调，没有稳态误差。

带材的“蛇行”运动是纠偏控制系统最难克服的干扰形式，所以将能克服“蛇行”运动为设计目标之一。在工程设计中可将“蛇行”运动近似为正弦运动，所以仿真该系统在正弦输入下的响应<sup>[4-5]</sup>。如图 6 所示，是系统在正弦输入下的仿真曲线，与给定的正弦信号非常接近，可见，系统具有较好的跟随性。

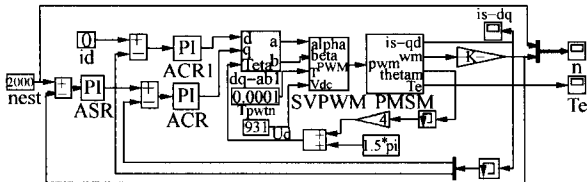


图 3 永磁同步电机矢量控制调速系统仿真模型

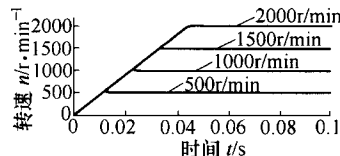


图 4 电动机动态响应仿真曲线

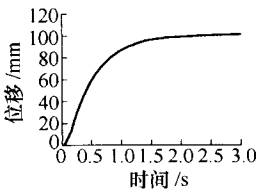


图 5 位移 100mm 时的阶跃响应曲线

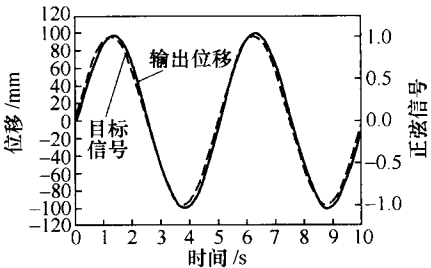


图 6 纠偏缸位移对正弦信号的响应

4 结论

以变转速定量泵直接驱动液压缸伺服系统为研究对象，建立了系统的数学模型和仿真模型，仿真结果表明变转速定量泵直接驱动液压缸系统的动态响应速度和正弦信号跟随性较好，可以满足低速卷取机带钢纠偏伺服控制要求，为将泵控缸技术应用于带钢纠偏系统提供了一定的理论依据。

参 考 文 献

[1] 胡盘峰,陈慧敏.带钢跑偏电液伺服控制系统研究与 SIMULINK 仿真[J].机床与液压,2009,(10):246-248.

[2] 权龙.泵控缸电液技术研究现状、存在问题及创新解决方案[J].机械工程学报,2008,44(8):88-92.

[3] 张红娟,权龙,李斌.永磁同步电动机直驱泵控差动缸位置伺服系统性能研究[J].中国电机工程学报,2010,30(24):107-112.

[4] 徐同旺.光电液伺服式带材纠偏与对中控制[J].冶金自动化,1994,18(6):29-32.

[5] 郑淑娟,贾建涛,段现银.比例阀控电液纠偏系统的设计与分析[J].机床与液压,2010,38(8):57-59.

[6] 吴红伟,杨家军,程远雄.新型永磁同步直线电机的有限元分析和实验研究[J].机电工程,2013,(5).