

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.037

基于能量调节的电液变频速度控制系统^{*}

沈海阔¹ 智少丹¹ 金波²

(1. 北京交通大学机械与电子工程学院, 北京 100044;

2. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 310027)

【摘要】 为了克服传统电液变频系统响应速度慢的缺点,设计了一种基于能量调节的电液变频调速系统,系统中带有能量调节装置,该装置能够在系统减速时吸收多余的能量,而在系统加速时释放储存的能量,从而加快系统响应速度。进行了3种液压调速方式的对比实验,实验表明,本系统能够在加速和减速时都拥有很好的动态特性,接近节流调速系统;并且具有良好的功率匹配特性,节流及溢流损失很小,甚至低于传统的电液变频调速系统。

关键词: 能量调节器 变频调速 液压缸 速度控制

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)04-0197-05

Variable Frequency Electro-hydraulic Velocity Control System Based on Energy Regulation Strategy

Shen Haikuo¹ Zhi Shaodan¹ Jin Bo²

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

2. The State Key Lab of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract

A variable frequency electro-hydraulic control system based on energy regulation was developed to improve slow response of the conventional variable frequency electro-hydraulic systems. An energy regulation device which could store redundant energy while hydraulic system was in decelerating period as well as release energy while the system was in accelerating period was employed in the variable frequency electro-hydraulic control system. This will enhance the dynamic characteristics of the variable frequency electro-hydraulic control system. The experiments results which were compared with two other control systems showed that the variable frequency electro-hydraulic control system had excellent dynamic characteristics which like valve control systems. Furthermore, the throttle and relief energy loss of this system was little and even lower than conventional variable frequency hydraulic control systems.

Key words Energy regulation, Variable frequency, Hydraulic cylinder, Velocity control

引言

液压传动技术在各种农业机械设备中有着广泛的应用,近年来,随着能源供应的日益紧张,降低液压系统的装机功率和能耗成为设计人员关心的重要课题。电液变频调速技术可以根据负载的需要来改变系统输入能量的大小,实现容积式节能的效果,具

有良好的节能特性^[1~2];与传统的容积式调速相比,电液变频调速系统具有更高的可靠性和更宽的调速比。

但是,在电液变频调速系统中,受到电动机的大转动惯量和变频器过载能力的限制,电动机的加减速周期都比较大,这大大降低了电液变频调速系统的响应速度^[3];并且低速时泵的输出流量会出现脉

收稿日期: 2011-04-22 修回日期: 2011-05-25

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50505042)、铁道部重点资助项目(20100G008-C)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011JBM279)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(2010009120029)

作者简介: 沈海阔,副教授,主要从事机电控制和流体传动研究, E-mail: Shenhk@bjtu.edu.cn

动^[4],且变频器的带负载能力也会下降^[5],导致系统低速性能差。有设计者采用在主回路中加装节流阀的方法来加快系统减速时的响应速度,但是这又会带来减速时的节流及溢流损失,并且系统加速慢的问题仍无法解决。当前研究大部分集中在控制策略方面,对液压系统本身的关注比较少,结果都不理想。所以到目前为止,电液变频调速技术只能应用于液压电梯等对响应速度要求不高的场合^[6],无法取得进一步的应用。

本文提出在传统的电液变频调速系统中加入能量调节装置的方法,构成基于能量调节的电液变频控制系统的设计思想,并且在前期研究成果的基础上进行液压缸速度控制系统的研究。

1 系统结构与设计方案

从电液变频调速系统整体能量调节的观点来看,在系统加速时执行元件需要大量的能量输入,而由于电动机及泵响应速度慢,不能及时提供这些能量,所以加速较慢。而在系统减速时需要将能量吸收,同样由于电动机及泵响应较慢,不能获得很快的减速。在系统中增加一个能量调节装置,在减速时吸收能量,而在加速时释放其中储存的能量,进行能量的平衡,既可以加快系统的响应速度,又可以获得更高的节能效率。为了达到此目的,基于能量调节的电液变频控制系统采用如下设计方案:

(1)在系统中增加能量调节器。它的控制必须从整个系统能量调配出发,在液压源的输出能量不能满足系统需求时释放能量,而在液压源输出能量大于系统需求时吸收能量^[7]。在液压系统中,系统的能量是通过压力油液的流动实现的,因此能量调节器可以通过吸收和释放压力油来实现能量的调节。能量调节器的硬件结构如图 1 所示。

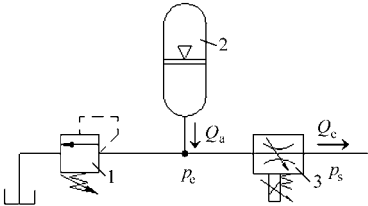


图 1 能量调节器结构原理图
Fig. 1 Scheme diagram of energy regulation device
1. 溢流阀 2. 蓄能器 3. 比例节流阀

蓄能器用来存储压力油液;比例节流阀用来控制进、出能量调节器的流量;溢流阀起安全阀作用,正常工作时不开启。

由于正常工作时,蓄能器充压和释压的时间很短,可以假定蓄能器工作在绝热状态,根据气体的热力学方程,可以得到

$$p_e V_a^{1.4} = p_0 V_0^{1.4} \text{const} \tag{1}$$

式中 p_e ——能量调节器内部压力
 V_a ——蓄能器内部气体体积
 p_0 ——蓄能器预充压力
 V_0 ——蓄能器有效容积

将式(1)对时间 t 进行微分并整理可得蓄能器的瞬时输出流量

$$Q_a = \frac{dV_a}{dt} = - \frac{p_0^{0.7} V_0}{1.4 p_e^{1.7}} \frac{dp_e}{dt} \tag{2}$$

比例节流阀通流流量 Q_e 与电流 I_t 的流量方程为

$$Q_e = \frac{K_v}{\frac{1}{\omega_v} S + 1} I_t \sqrt{|p_e - p_s|} \text{sgn}(p_e - p_s) \tag{3}$$

式中 K_v ——比例阀流量系数
 ω_v ——阀芯自振频率
 p_s ——能量调节器出口压力
能量调节器的流量连续性方程为

$$Q_a - Q_e = \frac{V_0 - V_a}{E_h} \frac{dp_e}{dt} \tag{4}$$

式中 E_h ——油液弹性模量

式(2)、(3)、(4)即为能量调节器的数学模型。从中可得出,能量调节器在任意时刻所能调节的总能量为

$$E_e = - \int_0^t p_e V_a Q_a dt \tag{5}$$

(2)在系统中保留电液节流控制。它的目的在于解决系统低速性能差的问题,低速时使泵维持某一最低转速,获得稳定的输出压力,而由控制阀节流控制实现对系统调节,多余的能量由能量调节器吸收。其次,提高系统减速时的响应速度,此时多余的能量亦可由能量调节器吸收,从而最大限度上减小节流及溢流损失。在通常时它保持最大开口,从而尽量减少节流损失。

以液压缸速度控制系统为例,系统的总体结构如图 2 所示。

图 2 虚线框中的部分为能量调节器,电动机的转速受变频器的控制,通过改变变频器的输出频率可以控制泵的输出流量;比例方向阀用来控制液压缸活塞杆的运动方向;系统压力和流量由变频器、能量调节器和比例方向阀共同控制。

系统的数学模型和建模过程已经进行了详细推导和分析^[8~9],从数学模型可知,本系统是一个 3 输入 1 输出的强非线性系统,其输入为变频器的控制频率 f_m 、能量调节器节流阀控制电流 I_t 、主回路比例方向阀控制电流 I_d ,输出为液压缸活塞杆的速度 v_p 。

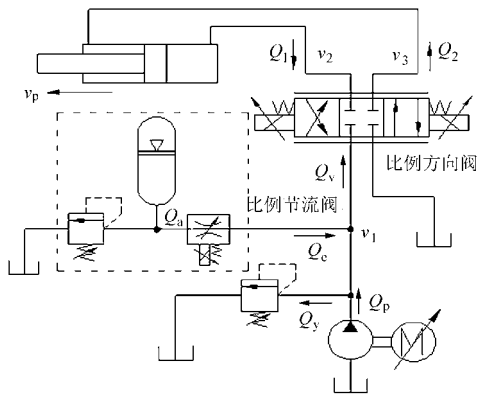


图 2 系统结构原理图

Fig. 2 Scheme diagram of hydraulic system

2 控制策略

对于控制器,其输入为系统速度输入信号 v_{in} , 输出信号为变频器、比例方向阀、能量调节器的控制信号,由于能量调节器中的储能元件蓄能器是由压力驱动的被动元件,所以控制器还要采集能量调节器的内、外压力 p_e 和 p_s ,由此控制器是一个 4 输入 3 输出的控制模块。

从系统的设计思想看,能量调节器、比例节流阀、泵转速三者都需要根据当前的加、减速预期进行控制,对于液压缸位置控制,加、减速预期非常难以判断,需要复杂的控制算法^[7],而本文所论述的速度控制系统只需要进行系统速度输入和当前的实际速度的对比即可知道需要加速或减速,控制算法相对容易设计:

(1) $v_{in} > v_p$ 时,系统需要加速,电动机转速增加,电液比例方向阀保持最大开口。如果此时 $p_e > p_s$,能量调节器打开释放能量,否则,能量调节器关闭。

(2) $v_{in} < v_p$ 时,系统需要减速,电动机转速下降,电液比例方向阀开度减小,进行节流。如果 $p_e > p_s$,能量调节器关闭,否则,能量调节器打开,吸收多余能量。

(3) $v_{in} = v_p$ 时,系统处于稳态,电动机转速保持不变,电液比例方向阀用于精度控制。如果 $p_e > p_s$,能量调节器关闭,否则,能量调节器打开,吸收多余能量。

(4) v_p 很小,处于低速时,电动机转速维持稳定流量输出的最低转速,电液比例方向阀用于精度控制。如果 $p_e > p_s$,能量调节器关闭,否则,能量调节器打开,吸收多余能量。

变频器控制采用前馈和反馈的组合控制方式,由输入速度 v_{in} 计算得出基础转速,再根据误差进行调节,上述的 4 种情况可以统一用图 3 所示的控制

原理框图表示。

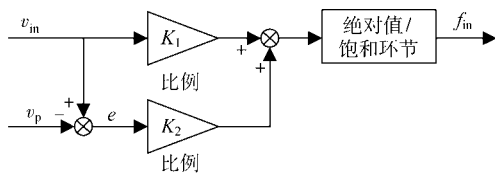


图 3 变频器控制原理框图

Fig. 3 Scheme diagram of inverter control module

变频器的总控制表达式为

$$f_{in} = \min(\max(|K_1 v_{in} + K_2 e|, f_{min}), f_{max}) \quad (5)$$

式中 f_{max} ——电动机最高允许转速所对应的变频器控制频率

f_{min} ——电动机最低允许转速所对应的变频器控制频率

电液比例方向阀主体采用积分分离 PID 控制,再配合以简单的逻辑判断,其控制公式为

$$I_d = \begin{cases} I_{dmax} & (v_p > v_{in}) \\ k_{dp} e(k) + k_s k_{di} \sum_{i=0}^k e(i) + k_{dd} (e(k) - e(k-1)) & (v_p \leq v_{in}) \end{cases} \quad (6)$$

其中 $k_s = \begin{cases} 1 & (e \leq e_0) \\ 0 & (e > e_0) \end{cases}$

式中 I_{dmax} ——阀的最大开口电流

k_s ——积分分离系数

能量调节器的电液比例节流阀采用积分分离 PID + 逻辑判断的控制方式,其控制公式为

$$I_t = \begin{cases} k_{dp} e(k) + k_s k_{di} \sum_{i=0}^k e(i) + k_{dd} (e(k) - e(k-1)) & (v_{in} > v_p, p_e > p_s) \\ k_{dp} e(k) + k_s k_{di} \sum_{i=0}^k e(i) + k_{dd} (e(k) - e(k-1)) & (v_{in} < v_p, p_e < p_s) \\ k_{dp} e(k) + k_s k_{di} \sum_{i=0}^k e(i) + k_{dd} (e(k) - e(k-1)) & (v_{in} = v_p, p_e < p_s) \\ k_{dp} e(k) + k_s k_{di} \sum_{i=0}^k e(i) + k_{dd} (e(k) - e(k-1)) & (v_p < v_{p0}, p_e < p_s) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (7)$$

3 实验

为了检验本系统的控制性能,建立了如图 2 所示的液压实验台,另外加装了压力变送器、流量计和转矩转速仪等传感器用于采集实验数据,采用一台工控机作为实验台的总控制器。为了使本系统的性能指标有一个明确的参照,在同一实验台上另外进行了节流调速系统和普通的电液变频调速系统实

验,进行响应速度及能耗性能对比。

3.1 节流调速系统

在此实验中,将变频器输出频率固定为 50 Hz,能量调节器关闭,系统流量只受比例方向阀的控制,多余流量从溢流阀流走。

3.2 普通电液变频调速系统

在此实验中,能量调节器关闭,变频器的输出频率受控制器的控制,比例方向阀用来控制液压缸活塞杆的运动方向和起停。

实验台的关键参数如表 1 所示。

表 1 实验台关键参数 Tab.1 System parameters	
参数	数值
电动机功率 P_m/kW	15
泵排量 $q_p/\text{m}^3 \cdot \text{r}^{-1}$	4.0×10^{-5}
电动机极对数 P	2
溢流阀设定压力 p_{cr}/MPa	7
蓄能器预充压力 p_r/MPa	5
蓄能器容积 V_{at}/m^3	6.3×10^{-3}
液压缸长度 L_c/m	0.3
活塞杆左面积 A_{p1}/m^2	3.12×10^{-3}
活塞杆右面积 A_{p2}/m^2	1.53×10^{-3}
负载质量 M/kg	20

实验的输入速度信号为液压系统中最常见的方波信号,经过实验,本实验台电动机的最低转速为 270 r/min,低于此转速系统将不能获得稳定的压力输出,本实验将最低转速设定为 300 r/min。3 种实验系统的速度响应曲线如图 4 所示。

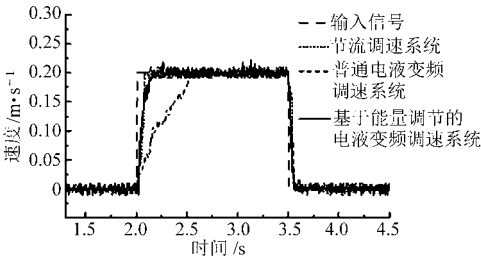


图 4 响应对比曲线
Fig. 4 Comparing of response curves

从图 4 可看出,在加速时,基于能量调节的电液变频调速系统的响应很快,甚至可以达到节流调速系统的响应速度,明显快于普通的电液变频调速系统;在减速时,由于 3 种系统都采用节流控制,所以减速响应基本相同。

图 5 为基于能量调节的电液变频调速系统电动机转速曲线,当液压缸速度为零时,电动机工作

在最低转速,以最大限度节能。可以看到电动机从低转速到高转速要加速 0.4 s,减速时间也大致相同,这是造成电液变频调速系统响应慢的最主要原因。

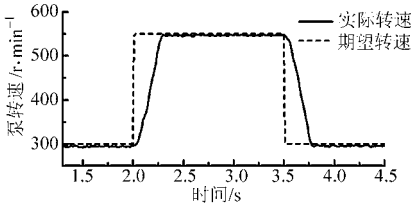


图 5 泵转速曲线
Fig. 5 Rotate speed of pump

系统压力及能量调节器内的压力如图 6 所示。在液压缸静止时,由于电动机存在着最低转速,系统流量全部溢流,此时系统压力为溢流阀的溢流压力,当液压缸运动时,泵的输出流量全部用来驱动液压缸活塞杆的运动,不产生溢流。根据液压缸动力学方程

$$p_1 A_{p1} - p_2 A_{p2} = M \frac{dv_p}{dt} + B_p v_p \tag{8}$$

式中 B_p ——粘性阻尼系数
可见,系统压力仅用于克服负载的惯性力和摩擦力,所以压力大大降低。

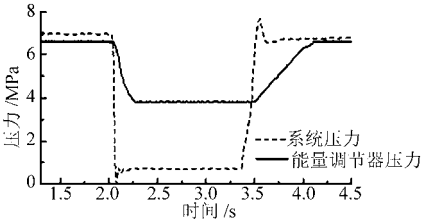


图 6 系统及能量调节器压力曲线
Fig. 6 Pressure of system and energy regulation device

当系统加速时,能量调节器打开释放其中存储的高压油液,在系统加速时能量调节器压力下降(图 6);当液压缸活塞杆速度达到目标值之后系统加速停止,能量调节器关闭,压力保持在 4 MPa 不变;当系统减速时,比例阀快速关闭,此时系统压力骤然升高,能量调节器打开吸收流量,能量调节器压力上升。

在系统工作过程中,能量调节器所做的功,即能量调节器所能调节的瞬时能量为

$$W_e = p_e Q_e \approx p_e Q_a \tag{9}$$

Q_a 可由式(2)中 p_e 求出,而 p_e 如图 6 所示,所以可求出能量调节器调节的能量曲线 W_e 如图 7 所示。由于计算中运用了微分运算,所以在变化剧烈的地方引入了较大的干扰。在图中可以明显看出在系统加速时能量调节器有瞬时的对外做功,功率峰值接近 1.5 kW,在系统减速时,能量调节器做负功吸收能量。

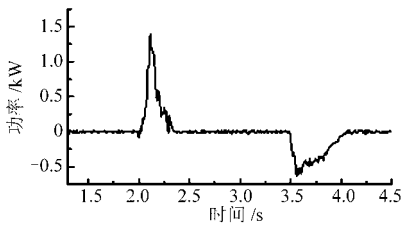


图 7 能量调节器功率调节曲线

Fig. 7 Energy regulated by energy regulation device

图 8 为 3 种调速系统能耗对比曲线。从图中可以看到,节流调速系统的能耗最大,大部分时间都是满功率运行,只是在液压缸起停瞬间由于压力波动,功率才出现变化。普通的电液变频调速系统和基于能量调节的电液变频调速系统的能耗基本相同,比节流调速系统要小的多。但是在系统减速时普通的电液变频调速系统由于产生较大的节流及溢流损失,所以能耗曲线出现了一个很大的尖峰,而基于能量调节的电液变频调速系统由于在系统减速时多余的流量被能量调节器吸收,产生的节流和溢流损失很小,所以尖峰明显小得多。

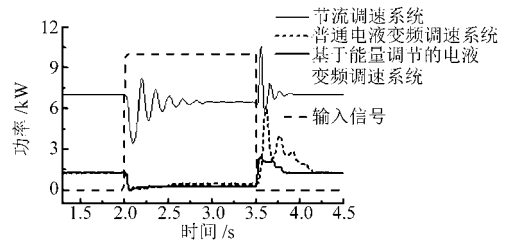


图 8 能耗对比曲线

Fig. 8 Compared curves of energy cost

4 结论

(1)本系统的动态性能较普通的电液变频调速系统大为提高,由于能量调节单元的作用,其响应速度可以达到节流调速系统的水平。

(2)在维持快速响应的同时,系统的能耗很低,甚至低于普通的电液变频调速系统,而大大低于节流调速系统的能耗。

(3)系统实现方便,成本低。可以通过在原有的液压系统中加装能量调节器来进行完成改造,具有很好的应用价值。

参 考 文 献

- Yang Huayong, Yang Jian, Xu Bing. Computational simulation and experimental research on speed control of VVVF hydraulic elevator[J]. Control Engineering Practice, 2004, 12(5): 563 ~ 568.
- Liu G P, Delay S. Optimal-tuning nonlinear PID control of hydraulic systems[J]. Control Engineering Practice, 2000, 8(9): 1 045 ~ 1 053.
- 彭天好,徐兵,杨华勇. 变频液压技术的发展及研究综述[J]. 浙江大学学报:工学版,2004, 38(2): 215 ~ 221.
Peng Tianhao, Xu Bing, Yang Huayong. Development and research overview on variable frequency hydraulic technology[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2004, 38(2): 215 ~ 221. (in Chinese)
- 寇子明,张慧贤,廉红珍,等. 变频液压可控周期性激振测试系统设计与仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 226 ~ 230.
Kou Ziming, Zhang Huixian, Lian Hongzhen, et al. Design and simulation of active hydraulic excitation system based on frequency conversion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 226 ~ 230. (in Chinese)
- Kim C S, Lee C O. Speed control of an overcentered variable-displacement-displacement hydraulic motor with a load-torque observer[J]. Control Engineering Practice, 1996, 4(11): 1 563 ~ 1 570.
- Hakan Akyildiz. Experimental investigation of pressure distribution on a cylinder due to the wave diffraction in a finite water depth[J]. Ocean Engineering, 2002, 29(9): 1 119 ~ 1 132.
- 石荣玲,赵继云,孙辉. 液压混合动力轮式装载机节能影响因素分析与优化[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 31 ~ 35.
Shi Rongling, Zhao Jiyun, Sun Hui. Energy-saving potential and influencing factors for hydraulic hybrid wheel loader[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 31 ~ 35. (in Chinese)
- Shen Haikuo, Jin Bo, Chen Ying. Study on energy-saving variable speed hydraulic control system[C]// Proceedings of the International Conference on Advanced Design and Manufacture (ADM2006), 2006, 1: 806 ~ 811.
- 沈海阔,金波,陈鹰. 基于能量调节的电液变转速控制系统[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 209 ~ 213.
Shen Haikuo, Jin Bo, Chen Ying. Variable speed hydraulic control system based on energy regulation strategy[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 209 ~ 213. (in Chinese)