

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.06.015

变转速泵控马达调速系统前馈补偿控制研究*

柴小波¹, 艾超^{2*}, 闫桂山²

(1. 宁波斯达弗液压传动有限公司, 浙江 宁波 315800; 2. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:针对变转速泵控马达调速系统稳速控制问题,建立了定量泵-变量马达调速系统数学模型。以数学模型为基础,考虑了系统变转速动力输入时变性和随机性对系统稳速输出的干扰,提出了前馈补偿控制方法,并对其数学模型进行了推导分析,得到了系统前馈补偿控制传递函数框图。该方法以系统流量为中间控制变量,通过定量泵扰动转速引起的系统流量变化实时补偿变量马达摆角,以实现系统稳速输出。以燕山大学泵控马达实验平台为基础,采用变频电机驱动定量泵实现了系统变转速输入,并以实验平台为基础搭建了 Matlab/Simulink 仿真平台,最后对所提出的前馈补偿控制方法进行了仿真与实验研究。仿真和实验结果表明,所提出的控制方法具有良好的控制效果,为变转速泵控马达系统的工程应用奠定了基础。

关键词:泵控马达;调速系统;变转速输入;前馈补偿

中图分类号:TH137

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)06-0718-04

Feedforward compensation control in variable-speed pump control motor system

CHAI Xiao-bo¹, AI Chao², YAN Gui-shan²

(1. Ningbo STF Hydraulic Transmissions Co., Ltd., Ningbo 315800, China;

2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Aiming at the steady speed output control of variable-speed pump control motor system, mathematical models for fixed displacement pump-variable displacement motor of hydraulic system were established. Considering the interference in steady speed output caused by variability and randomness of variable speed input, the feedforward compensation control method was proposed. Mathematical model for this method was derived and analyzed. The transfer function block diagram of feedforward compensation control system was obtained. The variable motor swing angle was real-timely compensated according to the flow change caused by disturbance input, achieving steady speed output. Simulation and experimental research on feedforward compensation control method was proposed, based on pump motor control test platform of yanshan university. The variable speed input was achieved by variable frequency motor driving fixed displacement pump. Matlab/Simulink simulation platform was built based on the test platform. The simulation and experimental results indicate that the proposed control method has good control effect. This research lay foundation for variable speed pump control motor system in engineering applications.

Key words: pump control motor; speed control system; variable speed input; feedforward compensation

0 引 言

变转速泵控马达系统采用容积调速原理,避免了

阀控系统溢流和节流损失,具有功率损耗小、传动效率高等优点^[1-2]。因而被广泛应用于大型风力机^[3-4]、液压电梯^[5]、行车发电^[6-7]等工程领域。

收稿日期:2016-02-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51405423);燕山大学青年教师自主研究计划课题(13LGB005)

作者简介:柴小波(1979-),男,浙江江山人,工学硕士,工程师,主要从事液压马达、液压系统的设计研发方面的研究. E-mail: chaixb@163.com

通信联系人:艾超,男,博士,副教授. E-mail: aichao@ysu.edu.cn

变转速泵控马达调速系统在实际工程应用过程中,系统动力输入通常具有时变性和随机性,而要求系统保持稳速输出。因此,对变转速泵控马达调速系统的稳速控制研究具有重要的工程意义。国内外相关学者针对变转速泵控马达调速系统的位置控制^[8-10]、效率特性^[11]和抗干扰鲁棒控制^[12]等进行了相关研究。

本研究针对变转速泵控马达稳速输出问题,提出前馈补偿控制方法,对变转速输入时变性和随机性引起的系统输出扰动进行补偿控制,并对该方法进行仿真与实验验证。

1 变转速泵控马达调速系统分析

笔者所研究变转速泵控马达调速系统采用定量泵-变量马达液压传动方式,其工作原理如图 1 所示。

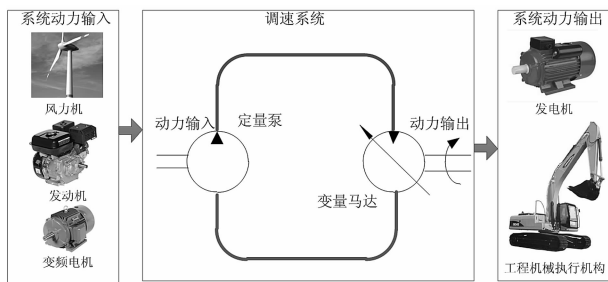


图 1 变转速泵控马达调速系统工作原理图

如图 1 所示,变转速泵控马达调速系统在工程应用中,其系统变转速动力输入通常具有时变性和随机性,例如大型风力机的风轮动力输入、行车发电发动机动力输入、液压电梯变频电机动力输入等。而系统输出要求保持稳速,例如风电机组工频并网发电、工程机械平稳运行等。

液压调速系统采用定量泵-变量马达液压传动方式,通过调整变量马达摆角实现系统容积调速控制,确保系统的稳速输出。

2 数学模型

2.1 定量泵数学模型

定量泵流量连续性方程为:

$$Q_p = D_p \omega_p - C_{ip} p_h \quad (1)$$

式中: D_p —定量泵排量, m^3/rad ; Q_p —定量泵流量, m^3 ; ω_p —定量泵角速度, rad/s ; p_h —系统压力, Pa ; C_{ip} —定量泵泄漏系数, $m^3/(\text{s} \cdot \text{Pa})$ 。

2.2 变量马达模型

变量马达流量连续性方程为:

$$Q_m = D_m \omega_m + C_{im} p_h \quad (2)$$

变量排量梯度控制方程为:

$$D_m = K_m \gamma \quad (3)$$

变量马达力矩平衡方程为:

$$D_m p_h - T = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m \quad (4)$$

式中: D_m —变量马达排量, m^3/rad ; Q_m —变量马达流量, m^3 ; ω_m —变量马达角速度, rad/s ; C_{im} —变量马达泄漏系数, $m^3/(\text{s} \cdot \text{Pa})$; B_m —变量马达侧阻尼系数, $\text{N}/(\text{m}/\text{s})$; γ —变量马达斜盘倾角大小(0-1); K_m —变量马达排量梯度, m^3/rad ; T —负载力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; J_m —变量马达侧总转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

2.3 液压管路数学模型

定量泵-变量马达系统管路考虑油液压缩性,其流量方程为:

$$Q_p - Q_m = \frac{V_0 dp_h}{\beta_e dt} \quad (5)$$

式中: V_0 —系统管路总容积, m^3 。

3 前馈补偿控制

由变转速泵控马达调速系统分析可知,影响系统稳速输出的关键问题在于系统动力输入的波动性和随机性。

进一步,定量泵动力输入的波动性和随机性直接影响系统的流量状态,对变量马达稳速输出形成干扰。本研究针对定量泵变转速扰动问题提出了一种前馈补偿控制方法。

前馈补偿控制方法以系统流量为中间控制变量,通过定量泵扰动转速引起的系统流量变化实时补偿变量马达摆角。由式(1~4)可得,前馈补偿数学模型为:

$$\gamma_0 = \frac{D_p \omega_p}{K_m \omega_m} \quad (6)$$

变转速泵控马达调速系统在稳速控制过程中,采用前馈补偿控制方法,配合转速偏差闭环控制,其控制原理如图 2 所示。

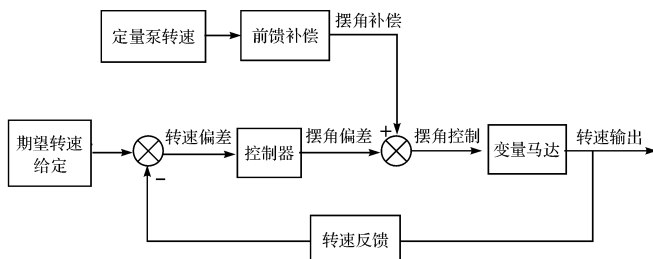


图 2 系统前馈补偿原理图

以上述前馈补偿数学模型为基础,结合式(1~4)分

析可得,系统前馈补偿控制传递函数框图如图 3 所示。

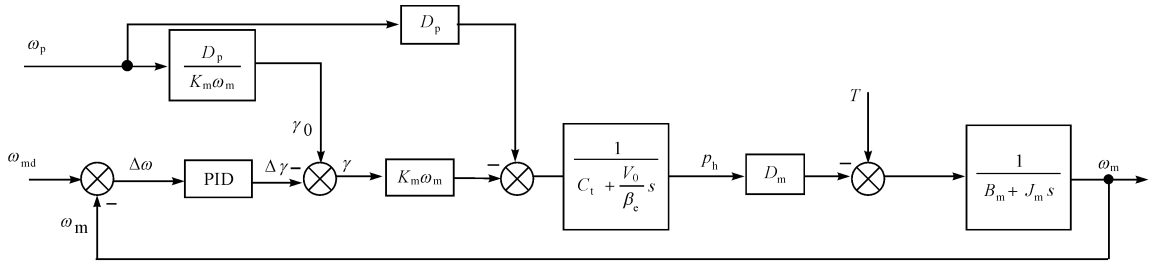


图 3 前馈补偿控制传递函数框图

由图 3 分析可知,变转速泵控马达调速系统稳速控制包括两部分,第一部分是转速偏差闭环控制,第二部分是前馈补偿控制。转速偏差闭环控制采用传统 PID 控制,对系统稳速输出进行基本控制。前馈补偿控制方法,依据系统时变输入 ω_p 引起的流量变化实时在线调整 γ_0 ,进而补偿系统变转速扰动引起的变量马达转速偏差,最终实现变量马达转速的稳速输出控制。

4 仿真与实验研究

笔者以燕山大学泵控马达实验平台为基础进行仿真和实验研究,该实验平台由定量泵-变量马达液压调速系统组成。实验过程采用变频电机驱动定量泵实现系统变转速输入,给定变频器随机转速信号使系统转速输入随机、时变调整,采用所提出的前馈补偿控制方法对液压调速系统进行稳速控制研究。

进一步,笔者采用 Matlab/Simulink 软件搭建仿真平台,仿真和实验过程中系统关键参数如表 1 所示,仿

真平台参数设定如表 2 所示。

笔者采用前馈补偿控制方法对系统进行稳速控制研究,得到仿真与试验曲线如图 4 所示。

表 1 仿真与实验系统关键参数表

序号	名称	参数	单位
1	定量泵排量	63	ml/r
2	变量马达排量最大值	40	ml/r
3	变量马达排量梯度	6.4×10^{-6}	m^3/rad
4	油液体积弹性模量	7.4×10^5	Pa
5	高压腔总容积	3×10^{-3}	m^3
6	变量马达稳速期望值	1 500	r/min

表 2 仿真参数设定表

序号	名称	参数	单位
1	随机变转速输入设定	300 ~ 460	r/min
2	马达摆角初始值	0.365	无量纲数
3	系统初始压力	21	MPa
4	仿真时间	10	s

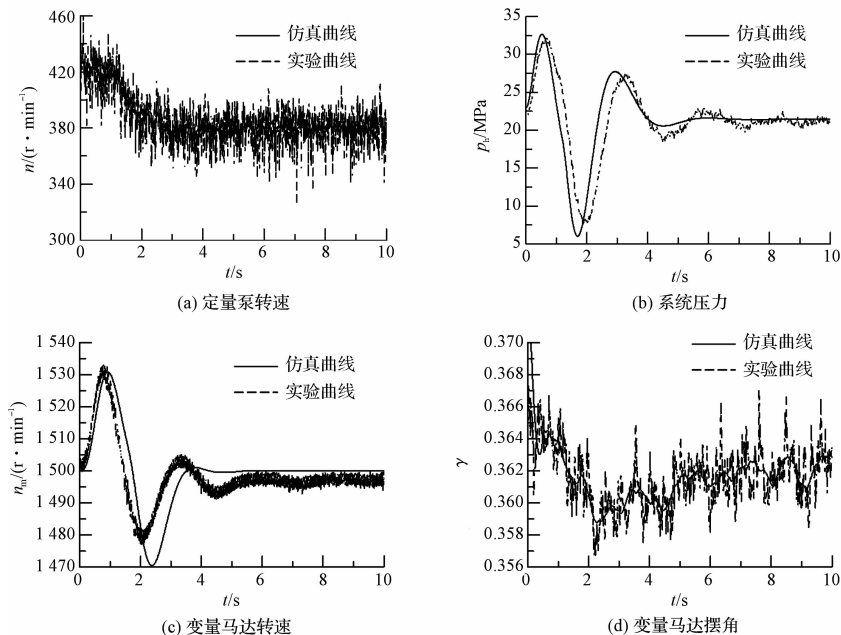


图 4 仿真和实验曲线

由图 4 仿真与实验曲线可知,当系统变转速扰动输入为 $380 \text{ r/min} \pm 40 \text{ r/min}$ 时,笔者采用本研究所提

出的前馈补偿控制方法对系统进行稳速控制,实时调整变量马达摆角大小,可有效地抑制系统变转速输入

的时变性和随机性干扰,可保证变量马达的稳速输出($1\ 500\ \text{r}/\text{min} \pm 5\ \text{r}/\text{min}$),满足变转速泵控马达工程应用需求。

为进一步研究前馈补偿控制效果,实验过程中,笔者将本研究所述控制方法与传统PID控制进行比较。实验结果如图5所示。

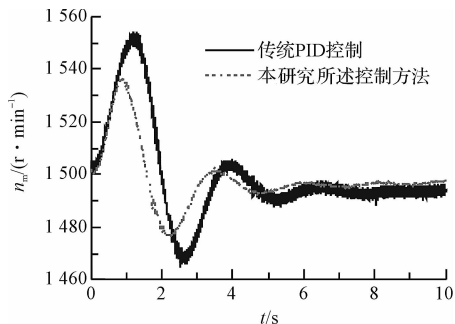


图5 实验对比图

由图5实验结果可知,采用本研究所述控制方法与传统PID控制相比,可以有效地补偿系统变转速输入引起的扰动,前馈补偿可以使变量马达转速波动幅度下降至 $\pm 5\ \text{r}/\text{min}$,超调量与稳定时间都有所改善,改善了变转速泵控马达的稳速控制效果。

5 结束语

本研究通过数学模型和仿真与实验研究,分析变转速泵控马达调速系统前馈补偿控制。主要得到以下结论:

(1)建立了变转速泵控马达调速系统数学模型;

(2)提出了一种前馈补偿控制方法,依据系统扰动转速输入引起的流量变化实时补偿变量马达摆角,改善了系统稳速控制效果。

(3)通过仿真和实验研究,验证了所提出控制方法的可行性和有效性。

本研究采用前馈补偿控制方法实现了变转速泵控马达系统输出转速的高精度控制,为该系统的工程应用奠定了一定的理论基础。

参考文献(References):

- [1] 彭天好,乐南更.变转速泵控马达系统转速降落补偿试验研究[J].机械工程学报,2012,48(4):175-181.
- [2] 蒙杨超,董自安,王珂.电液比例泵控马达系统辨识及实验分析研究[J].液压气动与密封,2015,35(3):35-40.
- [3] Diepeveen N F B, Segeren M L A. Stretching the applicability of the monopile by using a delft offshore turbine[J]. Wind Energy,2012,5(3):1-10.
- [4] 艾超,孔祥东,闫桂山,等.液压力型风力发电机组最优功率追踪控制方法研究[J].动力工程学报,2015,35(2):126-133.
- [5] 刘英杰,武星军,徐兵,等.液压电梯液压系统及现场检测方法研究[J].机床与液压,2014,42(4):32-37.
- [6] 杨俊智,杜遥,周强.自发电站电液比例泵控马达系统的优化控制[J].兰州理工大学学报,2013,39(5):42-45.
- [7] 邹炳燕.车载液压发电机组瞬态指标控制研究[J].机床与液压,2015,43(14):127-129.
- [8] 张磊,彭天好,钟日良,等.变转速泵控马达系统位置控制试验研究[J].机床与液压,2014,42(3):76-78.
- [9] 张金凤,冒杰云,袁寿其,等.变转速工况下洗车冷却水泵内外特性变化规律[J].流体机械,2014,42(8):1-6.
- [10] KILIC E, DOLEN M, CALISKAN H, et al. Pressure prediction on a variable-speed pump controlled hydraulic system using structured recurrent neural networks[J]. Control Engineering Practice,2014,26(3):51-71.
- [11] 丁海港,赵继云,李广洲.阀泵联合大功率液压调速方案分析[J].煤炭学报,2013,38(9):1703-1709.
- [12] 艾超,孔祥东,陈文婷,等.液压力型风力发电机组主传动系统稳速控制研究[J].太阳能学报,2014,35(9):1757-1763.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

柴小波,艾超,闫桂山.变转速泵控马达调速系统前馈补偿控制研究[J].机电工程,2016,33(6):718-721.

CHAI Xiao-bo, AI Chao, YAN Gui-shan. Feedforward compensation control in variable-speed pump control motor system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(6):718-721.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>