

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.04.009

基于林德 HPR-02E1L 开式变量泵的 挖掘机功率控制器研究

张学强, 张 锋, 孙 娜, 孟祥峰

(山重建机有限公司, 山东 临沂 276024)

摘要:针对应用林德 HPR-02E1L 开式变量泵的挖掘机功率匹配不佳问题,对 HPR-02E1L 负载敏感变量泵的工作原理、发动机转速控制策略及挖掘机工作过程的负荷情况等方面进行了研究,提出了一种基于发动机转速跟随的功率控制策略。利用 Matlab 下的 Simulink 平台搭建了系统各元件仿真模型,根据发动机实际转速、预设负载转速及系统负载压力,调整 PID 参数,标定了影响液压泵吸收功率的 VD3 电磁阀电流,使挖掘机运行过程中转速变化平稳。实验结果表明,功率控制器能够实时监控发动机实际转速,精确控制 VD3 电磁阀电流始终跟随发动机转速,使挖掘机在负载过程中可以获得较佳的协调性及稳定性。

关键词:负载敏感; Simulink; 转速跟随; PID; VD3 电磁阀电流; 功率控制器; 功率匹配

中图分类号: TH3; TD422.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)04-0366-05

Research of excavator's power controller for linde HPR-02E1L open variable pump

ZHANG Xue-qiang, ZHANG Feng, SUN Na, MENG Xiang-feng

(Mountain Reconstruction Machine Co., Ltd., Linyi 276024, China)

Abstract: Aiming at the problem that the poor performance of the power matching of excavator using linde HRP-02E1L open variable pump, the working principle of HRP-02E1L load sensing variable pump and the control strategy of engine speed and the loaded condition of the excavator working process were researched, and the power control method based on the engine speed following was proposed. Each element simulation model were constructed at simulink platform of matlab, according to engine actual speed and presupposed load speed and system loaded pressure, PID parameters was regulated and VD3 solenoid valve current decided to hydraulic pump power absorption was demarcated, as a result, the speed variation of the excavator operating process was stabilizing. The experimental result shows that the power controller can real-time monitor the engine actual speed and can control VD3 solenoid valve current precisely following engine speed, and the excavator can acquired good coordination and stability.

Key words: load sensing; Simulink; speed following; PID; VD3 solenoid valve current; power controller; power matching

0 引 言

随着现代工业生产对节能和环保的重视程度越来越高,变量泵在液压传动中应用越来越广。负载敏感控制的变量泵能够自动适应负载压力和流量的需要进行调节,具有较理想的控制特性,对比负流量控制系

统,其在低压区及高压溢流区的节能特性是显而易见的,所以对它进行分析研究具有较大的工程应用价值^[1]。

现在市场流行的挖掘机电子功率匹配,基于恒功率限制泵,通过减压阀来上下移动泵功率曲线,对泵功率控制没有太大改变。林德电子功率匹配在上世纪

收稿日期:2016-09-08

作者简介:张学强(1987-),男,山东临沂人,主要从事挖掘机电控系统研发、发动机与液压泵匹配策略方面的研究。E-mail: zhangxueqiang0601@

80年代末,就将机械功率限制完全去除,彻底简化泵控制模块,在发动机全转速范围内的功率充分匹配。林德采用电子功率跟随控制,保证泵能够吸收所有发动机扭矩。即使车辆到高海拔作业或机械有一定磨损后,电子功率控制器可以感知发动机特性的下降,会控制泵减少吸收扭矩,具有极佳的发动机跟随特性^[2-4]。

林德电子功率 CEB 控制器采用转速跟随控制,保证泵能吸收所有发动机扭矩。然而林德 CEB 为上世纪 90 年代产品,输出控制端口引脚少,发动机转速跟随控制功能未达到最佳,发动机油门控制策略落后。挖掘机厂家为满足整机各功能要求,必须额外增加一套功能控制器,即降低挖掘机整体电控系统可靠性又增加整机成本,因此开发一套基于 HRP-02E1L 开式变量泵的挖掘机功率控制器具有广阔的市场前景。

本研究针对应用林德 HPR-02E1L 开式变量泵的挖掘机功率匹配不佳问题,对 HRP-02E1L 负载敏感变量泵的工作原理、发动机转速控制策略及挖掘机工作过程的负荷情况等方面进行研究。

1 林德 HPR-02E1L 开式变量泵原理

HRP-02E1L 泵是用于开式系统的斜盘式轴向柱塞变量泵,集成负荷传感控制与电比例调节。

发动机启动前,在复位弹簧作用下,泵斜盘角度处于最大位置。发动机一旦启动,如果此时整个液压系统没有流量需求,则泵摆角在几十毫秒内迅速回到最小位置,保持泵出口压力为 30 bar 左右。

当主泵负荷传感阀的节流口开启,系统有流量需求时,泵的负荷传感控制机构会自动改变主泵排量,控制输出流量的大小,将节流孔两端的压差维持设定值 ΔP 。根据流体力学原理:

$$Q = K \cdot A \cdot \sqrt{\Delta P} \quad (1)$$

由式(1)可知, ΔP 保持恒定,意味着通过节流孔的流到负载的流量 Q 与节流孔过流面积 A 呈线性关系, A 越大,泵输出流量就越大。

液压原理图如图 1 所示。

节流口 1 两端压力(泵 2 的出口压力及负载压力)分别引到负荷传感器阀芯 4 的左端和右端,同时阀芯 4 的右端还承受弹簧 9 的压力。主泵工作时,阀芯 4 始终将节流口 1 两端的压差与弹簧 9 的预压力进行比较,根据比较结果决定变量缸大腔关闭(排量保持不变)或接泵壳体压力(排量增加)^[5]。

当节流口 1 关闭,执行元件无动作时,阀芯 4 被推

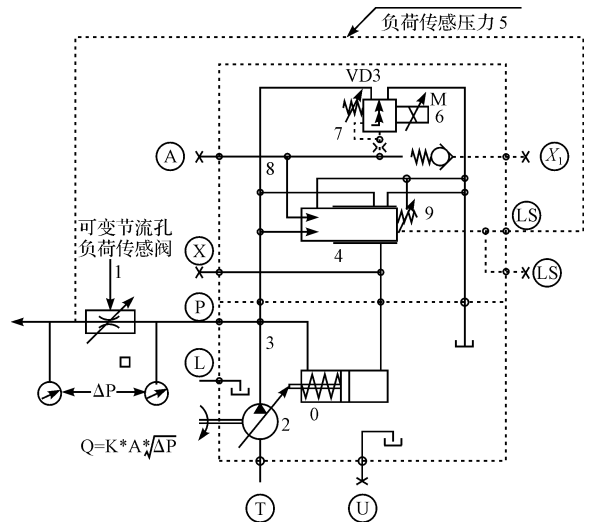


图 1 HPR-02E1L 液压原理图

X1—应急控制油口;A—比例减压阀输出压力测量口;LS—负载压力引入油口和测量口;X—变量压力测量口;1—调速阀(负荷传感阀);5—外部管路,引入负载压力信号;6—比例电磁铁;P—高压油出口(SAE 标准);T—吸油口(SAE 标准);LU—壳体注油/排气口

到右端,泵 2 的出口压力进入变量缸大腔,推动斜盘向小摆角变化,直到与变量缸小腔的复位弹簧 30 bar 左右压力平衡,形成储存压力。打开节流孔 1 后,由于此刻还没有流量经过节流口,节流口两端压差基本为零。阀芯 4 在弹簧 9 的预设压力推动下左移,变量缸大腔通泵壳体,在复位弹簧和储备压力的共同作用下,泵的斜盘向大摆角变化,排量迅速增大。随着通过节流口的流量增加,节流口两端压差不断升高,当其达到弹簧 9 的预设压力 ΔP 时,阀芯 4 将变量缸大腔的流量关闭,主泵排量停止变化,保持固定的输出流量。

负荷传感控制总是可以通过改变泵的排量,保持稳态时节流口两端压差等于 ΔP ,使输出流量与节流口开度保持线性关系。只有当系统需要的流量超出泵的最大共有能力时(泵排量已达到最大时继续增大节流口开度), ΔP 才会小于设定值^[6]。

参考液压原理图 1,电比例减压阀 VD3 的输出压力(由比例电磁铁 6 的输入电流决定)经通道 8 加到阀芯 4 的左端。其作用方向与弹簧 9 方向相反,部分抵消了弹簧 9 固定的 ΔP 。电比例调节加入后,负荷传感控制阀芯 4 将把节流口 1 两端的压差与当前实际的 ΔP 进行比较,通过调整泵的流量,使稳态时节流口两端压差保持为当前的 ΔP 。 ΔP 输出压力与控制电流呈反比例线性关系。负荷传感控制过程中,电比例调节的作用就是将原先固定的 ΔP 变为一个可以实时调整的参数,以满足整机工作要求。

从经济性、燃油消耗等考虑,在满足大部分作业工

况要求下,所选用发动机的功率一般要小于液压系统功率。在这种情况下,没有过载保护,当液压系统负荷过大时就会导致发动机掉速严重甚至熄火。发动机过载时,最明显的征兆是转速下降。利用这一特点,功率控制器可以根据检测到的发动机转速变化的快慢和幅度,将相应的控制电流发送到 VD3 电比例减压阀,调整实际的 ΔP 值,控制泵的排量,防止发动机过载。发动机、功率控制器和液压系统的良好匹配,既可以充分利用发动机功率,提高作业效率,又无过载之忧。

2 HPR-02E1L 控制策略分析

区别于川崎折线恒功率泵,林德 E1L 开式变量泵内部没有恒功率调节机构,为保证工作过程中泵吸收功率不大于发动机最大输出功率,必须增加控制 ΔP 变化的比例减压阀,并保证工作过程中 ΔP 跟随发动机转速实时发生变化。功率控制器控制液压泵吸收发动机设定掉速率内的全部功率,同时维持发动机转速稳定在设定负载转速,发动机转速越稳定,燃油经济性越好。因此功率控制器应运而生。

2.1 发动机实际转速采集

根据上述特性,发动机转速是林德 E1L 泵功率控制的最重要的信号,因此功率控制器需要对发动机实时转速实现精确测量。目前高压共轨发动机 ECU 以 10 ms 周期发送 EEC1 数据,功率控制器解析 EEC1 中第 4 与第 5 字节数据可准确获得发动机实际转速值^[7]:

$$V_{\text{Actual}} = \frac{(V_{\text{High}} \cdot 256 + V_{\text{Low}})}{8} \quad (2)$$

2.2 发动机转速控制方式

挖掘机不同的设定转速可通过 3 种方式进行调整,分别为 TSC1、EEC2 及电子油门踏板的方式。挖掘机正常工作时需将发动机提升至高转速,充分提升挖掘机液压泵吸收功率,TSC1 与 EEC2 为发动机转速控制常用两种控制方式。

TSC1 为发动机恒转速控制方式。当负荷增加时,发动机 ECU 可迅速控制增加喷油量提升发动机的扭矩,直到达预设最大外特性值。功率控制器依靠检测转速控制主泵吸收功率,利用 TSC1 控制方式,工作过程中发动机 ECU 及功率控制器均参与调节,调整过程中转速波动较大,主泵效率相对较低,发动机油耗高。

发动机掉速特性曲线如图 2 所示。

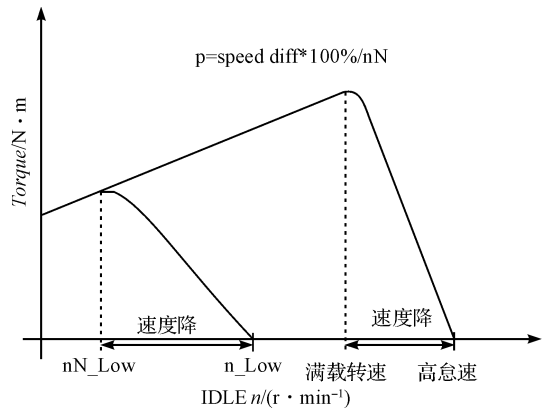


图 2 发动机掉速特性曲线

EEC2 控制方式类似机械泵发动机特性,设定目标掉速率较大,一般 5% ~ 20%。发动机 ECU 预设固定的喷油量,直到发动机转速降至目标负载转速后达到最大外特性值。EEC2 控制方式下,功率控制器在发动机允许掉速范围内,独自参与功率控制,转速变化平稳,主泵效率高,同时 EEC2 控制方式燃油经济性好。林德 E1L 功率控制器采用检测发动机掉速的方式实现与发动机的功率匹配,通过较好的掉速特性可实现与功率控制器的无缝连接。

2.3 HPR-02E1L 与发动机匹配控制

林德 HPR-02E1L 采用功率控制器跟随发动机转速控制,保证主泵能够吸收发动机所有扭矩,有效提升工作装置的运行速度。即使车辆到高海拔作业,功率控制器可以感知发动机扭矩特性的下降,自动控制主泵减少吸收扭矩,保证发动机稳定工作。

挖掘机工作过程中主泵压力跟随负荷大小变化如下式所示:

$$W = \frac{P \times Q}{60\eta} \quad (3)$$

式中: N —主泵吸收功率, η —主泵总效率, P —主泵的压力, Q —主泵的流量。

根据公式(1),当 VD3 电磁阀的电流决定的 ΔP 恒定时,负载压力 P 与阀开口面积 A 同时变的很大,主泵吸收功率 W 会超出发动机负载转速下最大功率,出现严重掉速,憋车,甚至熄火。功率控制器为保证发动机稳定工作,需实时跟随发动机转速,不断调整 VD3 电磁阀电流值,保证主泵最大吸收功率维持恒定。

挖掘机工作过程复杂,整个工作循环内压力变化剧烈,同时操作手柄无规律变化导致主阀开口面积随时变化,因此整个工作循环中液压泵吸收功率实时变化。

挖掘机工作中液压泵吸收功率曲线如图 3 所示。

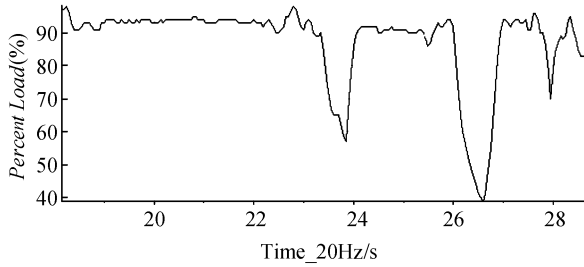


图 3 挖掘机工作中液压泵吸收功率曲线

主泵吸收功率变化影响发动机负荷变化,导致发动机实际转速发生变化,而功率控制器实时跟随发动

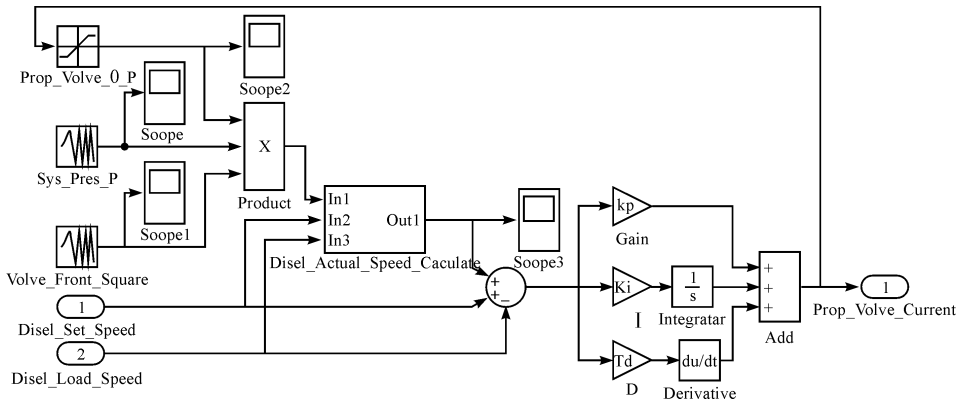


图 4 Simulink 仿真模型

本研究利用 Matlab7 版本的 Simulink6.0 进行仿真^[8-9]。仿真对象为发动机设定转速 1 900 r/min,设定掉速率 7% (即负载转速 1 748 r/min)时,发动机实际转速曲线与 VD3 电磁阀输出关系。输入压力 P 曲线值及阀开口面积 A 曲线值,改变 PID 参数,观察发动机实际转速及 VD3 电磁阀电流的输出特性如图 5 所示。

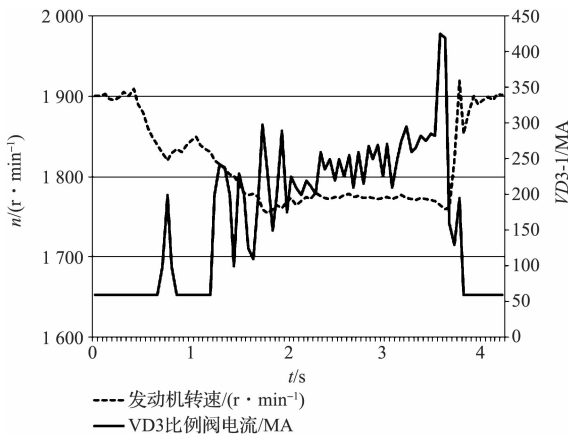


图 5 仿真模型输出特性

增大比例系数 P 一般将加快系统的响应,但过大的比例系数会使系统有较大超调。增大微分 D 有利于加快系统的响应速度,但抗干扰能力较差。增大积

机转速,控制 VD3 电磁阀电流发生改变,进而改变主泵吸收功率。由于整个液压系统响应时间、发动机掉速响应时间均有延迟,若 VD3 电流变化缓慢,会导致发动机瞬间掉速严重;若 VD3 电流变化过快,则发动机转速剧烈变化,进而导致工作装置忽快忽慢,影响整车稳定性。因此功率控制器电流与转速 PID 控制参数成为研究的重点。

3 PID 控制参数动态特性仿真

根据以上分析,本研究建立仿真模型如图 4 所示。

分 I 有利于减小超调,但静态差消除时间变长^[10]。

4 挖掘机整车匹配实验研究

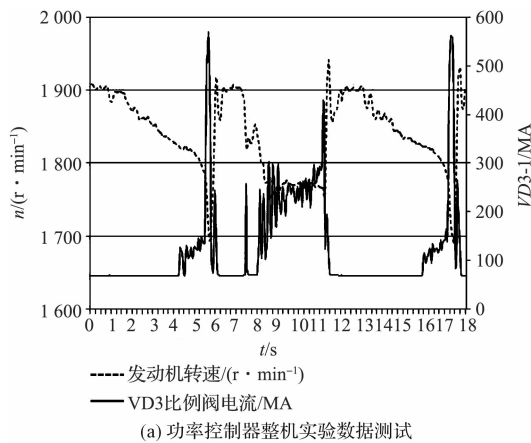
挖掘机整车发动机与液压匹配由功率控制器及发动机 ECU 实现。功率控制器根据发动机实际转速、预设负载转速及主泵负载压力,控制 VD3 电磁阀改变 ΔP 大小。发动机 ECU 根据预设转速、掉速率及负荷率,控制喷油量的大小,防止发动机掉速超出范围。功率控制器根据下式输出设定电流,通过 Matlab7 仿真模型寻求几组较佳的 PID 参数。

$$\begin{cases} R = P + D + PT1; \\ P = (n_{\text{setload}} - n) \times Kp; \\ D = (n_{\text{old}}(\text{Dtime 之前}) - n) \times Kd; \\ PT1 = [(n_{\text{setload}} - n) - PT1] \times Kpt1 + PT1; \\ I_{\text{max}} = I_{\text{max}} * R / 1000. \end{cases} \quad (4)$$

式中:R—比例阀控制电流的比例放大值;P—PID 控制的 P 值;D—PID 控制的 D 值;PT1—PID 控制的 I 值; n_{setload} —设定负载转速值;n—当前发动机实际转速值; $n_{\text{old}}(\text{Dtime 之前})$ —上周期发动机转速值;Kp—P 系数;Kd—D 系数;Kpt1—I 系数; I_{max} —比例电磁阀控制输出最大电流。

通过观察发动机转速与 VD3 电磁阀电流关系可

见,功率控制器与林德 CEB 曲线基本一致。工作装置的运行过程中,功率控制器通过调节 VD3 电磁阀电流,实现发动机转速平稳变化,进而使整车获得较好的



协调性及稳定性。

挖掘机斗杆往复运动时,功率控制器与林德 CEB 数据对比如图 6 所示。

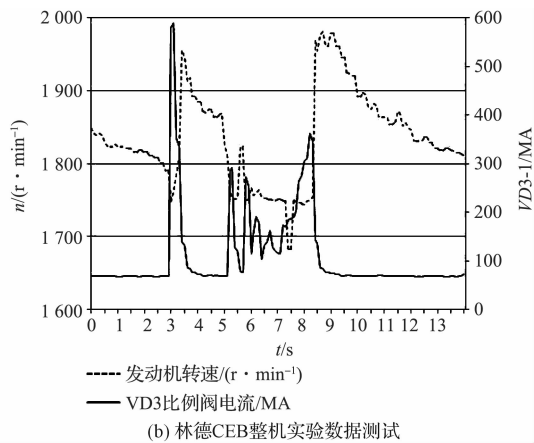


图 6 功率控制器与林德 CEB 数据曲线

5 结束语

本研究提出的基于林德 HPR-02E1L 开式变量泵的挖掘机功率控制器通过仿真及试验测试得到验证,实验结果表明,自主研发的功率控制器可完全取代林德 CEB 完成挖掘机功率匹配控制,并为以后整车效能及可靠性提升提供了广阔的空间。

在整机上通过实际的效率油耗实验数据对比,功率控制器与林德 CEB 数据相当,但整车仍需挖掘大量实验数据找到最佳工作点。在下一阶段,本研究将针对不同的工况环境进行控制方法完善。同时,通过大量的测试数据,寻求挖掘机最佳的工作区间。

参考文献 (References):

- [1] 安高成,刘小红,王明亮,等. 电液比例负载敏感控制径向柱塞泵仿真分析与实验研究[J]. 流体传动与控制,2006(14):8-10.
- [2] 罗向阳,权凌霄,关庆生,等. 轴向柱塞泵振动机理的研究

现状及发展研究[J]. 流体机械,2015,43(8):41-47,25.

- [3] 张洪信,程联军,张铁柱,等. 往复柱塞泵转套式配流系统的结构原理[J]. 流体机械,2015,43(8):48-51.
- [4] MICHAEL ZIVKOVIC. Regulation pump HRP-165D-02R Regulator E1L-H1L SPU[M]. Germany: Linde Hydraulics, 2011.
- [5] 王炎,胡军科,杨波. 负载敏感泵的动态特性分析与仿真研究[J]. 现代制造工程.2008(12):84-87.
- [6] 马冲,孔晓武. 负载敏感液压泵稳定性仿真与参数优化[J]. 机电工程,2011,28(5):548-552.
- [7] J1939/71. Vehicle application layer[S]. VSA: SAE issued, 2004.
- [8] 张德丰. MATLAB/Simulink 建模与仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
- [9] 刘学良. 液压挖掘机动力系统功率匹配控制技术研究[D]. 长沙:中南大学机电工程学院,2012.
- [10] 吴晓健. 液压挖掘机功率控制节能技术研究[D]. 长沙:中南大学机械电子工程学院,2005.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

张学强,张锋,孙娜,等. 基于林德 HPR-02E1L 开式变量泵的挖掘机功率控制器研究[J]. 机电工程,2017,34(4):366-370.

ZHANG Xue-qiang, ZHANG Feng, SUN Na, et al. Research of excavator's power controller for linde HPR-02E1L open variable pump[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(4):366-370.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>