

液压挖掘机的功率匹配控制方法

邓宇^{1,2},何清华^{1,2},张云龙²,刘学良²

1. 中南大学机电工程学院,长沙 410083

2. 山河智能装备集团,长沙 410100

摘要 针对当前挖掘机功率控制中常用的转速感应控制方法响应速度慢的缺点,根据液压挖掘机动力系统中液压泵与柴油发动机的动力特性,提出了柴油发动机恒扭矩输入控制与转速感应控制相结合的复合控制方法,建立了基于 Simulink 仿真平台的系统仿真模型,导入实际工况下的负载信号,对转速感应控制方法与复合控制方法进行仿真对比分析。仿真结果表明:复合控制方法比转速感应控制方法能更有效地稳定发动机的转速,减少发动机的最大掉速量,使液压泵能充分利用柴油发动机的输出功率,提高整机的效率。

关键词 液压挖掘机;功率匹配;转速感应;Simulink

中图分类号 U270.1

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.21.005

A Method on Power-matching Control of Hydraulic Excavator

DENG Yu^{1,2}, HE Qinghua^{1,2}, ZHANG Yunlong², LIU Xueliang²

1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

2. Sunward Equipment Group, Changsha 410100, China

Abstract Of the methods on power-matching control of hydraulic excavator now, the rotary inducing control is commonly used but has shortcoming of response lag. According to the dynamic characteristics of diesel engine and hydraulic pump in power system of hydraulic excavator, method of constant torque control combined with rotation speed feedback control is proposed, the system simulation model is established in Simulink, with the load signal in actual condition imported to the model, the two control methods are analyzed. The result indicate that the method of constant torque control combined with rotation speed feedback can stabilize the engine's speed and reduce the maximum lose of engine speed, make the hydraulic pump can make full use of the engine, so that elevate the excavator's effect.

Keywords hydraulic excavator; power-matching; rotation speed feedback control; Simulink

挖掘机的功率匹配控制决定了系统动力源的输出方式,直接影响到整车的动力性、经济性与操作流畅性。精确的整机动力系统模型是研究功率匹配效果及实现最佳匹配效果的基础,恰当的功率匹配控制方式则能实现整机动力系统的良好匹配^[1]。

目前挖掘机的功率匹配方式普遍采用的是转速感应控制^[2,3],该方式首先设置柴油发动机的目标工作转速,工作中根据柴油发动机的掉速量调整泵的排量,避免柴油发动机负载过大而导致燃油经济性的急剧恶化甚至熄火,从而实现功率匹配的目的^[4,5]。由于柴油发动机系统是大惯性系统,从柴

油发动机的负载变化到引起柴油发动机转速变化有一定的时间延时,因而单纯采用转速感应控制实现转速控制并不能取得很好的效果^[6,7]。在转速变化之前根据负载变化量调节泵的功率,则可以改善柴油发动机的负载特性,从而充分利用柴油发动机的功率并减小柴油发动机的掉速,改善整机经济性与操作协调性。基于此,本文以SWE230LC挖掘机为研究对象,根据泵的实际压力—流量特性及效率特性、柴油发动机的调速特性与外特性,分别建立液压泵与柴油发动机的仿真模型,采用泵的恒输入功率控制与转速感应控制相结合的方法,对挖掘机的功率匹配效果进行仿真研究。

收稿日期:2014-04-18;修回日期:2014-05-25

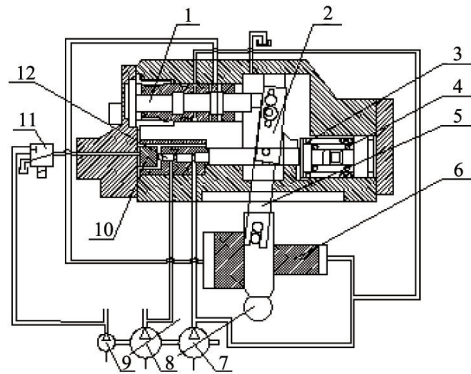
基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAF07B00)

作者简介:邓宇,博士研究生,研究方向为工程机械机电一体化技术,电子邮箱:13808473211@163.com

引用格式:邓宇,何清华,张云龙,等. 液压挖掘机的功率匹配控制方法[J]. 科技导报, 2014, 32(21): 37-42.

1 液压泵建模

本文研究的液压泵为川崎 K3V112 电控变量泵, 该泵为斜盘式柱塞泵, 其单泵的排量调节结构如图 1 所示。



1—换向阀芯; 2—伺服连杆; 3—弹簧 KA; 4—弹簧 KB; 5—反馈连杆; 6—伺服柱塞; 7—主泵 2; 8—主泵 1; 9—先导泵; 10—泵 2 功率控制柱塞; 11—电磁比例减压阀; 12—载荷柱塞

图 1 液压泵排量调节机构示意

Fig. 1 Schematic mechanism of hydraulic pump displacement adjustment

图 1 表示主泵 2 的排量调节机构^[8]。其中泵 1 与泵 2 的工作压力值分别表示为 P_1 、 P_2 , 电磁比例减压阀 11 的控制压力为 P_n 。泵 1、泵 2 是工作泵, 为斜盘式柱塞泵, 给工作装置供油; 先导泵 9 为齿轮泵, 给阀的控制装置供油。通过功率控制柱塞 10 调节载荷柱塞 12 初始位置, 使弹簧 KA 有一定的预紧力, 弹簧 KB 与载荷柱塞 12 末端有一定的间隙, P_n 和 P_1 、 P_2 共同作用在载荷柱塞 12 上, 对液压泵的排量进行调节^[9,10]。当 P_1 与 P_2 之和增大时, 载荷柱塞 12 右移并压缩弹簧 KA、KB, 换向阀芯 1 在伺服连杆 2 作用下右移, 从而泵的工作压力进入伺服柱塞 6 大腔使伺服柱塞 6 右移, 从而使泵 2 的摆角减小, 泵的排量降低, 同时伺服柱塞 6 右移使得换向阀芯 1 在反馈连杆 5 的作用下左移, 进而隔断伺服柱塞大腔油路, 使排量调节机构运动达到平衡, 阀芯静止。泵的压力降低时, 则调节过程相反。换向阀芯 1 静止时载荷柱塞 12 上的各个作用力的关系表达式为

$$P_1 A_1 + P_2 A_2 + P_n A_n = k_a \Delta x_a + k_b \Delta x_b + F_p \quad (1)$$

式中, A_1 为 P_1 作用在载荷柱塞的横截面的面积, A_2 为 P_2 作用在载荷柱塞的横截面的面积, A_n 为 P_n 作用在载荷柱塞的横截面, F_p 为弹簧 KA 的预紧力, Δx_a 、 Δx_b 分别为弹簧 KA 与 KB 相对于起始位置的压缩量, k_a 、 k_b 分别为弹簧 KA、KB 的弹簧刚度。

图 2 为泵 2 的 P - q 特性曲线图, 折线 A、C 分别表示液压泵在电磁减压阀最大输出压力和最小输出压力下的排量曲线, 折线 B 表示电磁减压阀处于某一压力下的泵排量曲线。通过式(1)分析可得, 当 P_1 、 P_2 与作用在载荷柱塞 12 上的合力不大于 F_p 时, Δx_a 、 Δx_b 值为 0, 阀芯运动距离为 0, 泵排量保持最大, 为 105 mL/r; 合力增大使阀芯运动距离 $\Delta x_a > 0$ 、 $\Delta x_b = 0$ 时, 载荷柱塞压缩单个弹簧 KA, 泵的排量以斜率 k_1 减小, 如图 2

中 A、B、C 折线的上半段; 当阀芯运动距离 $\Delta x_b > 0$ 时, 载荷柱塞压缩内外 2 个弹簧 KA、KB, 泵的排量以斜率 k_2 减小, 如图 2 中 A、B、C 折线的下半段。

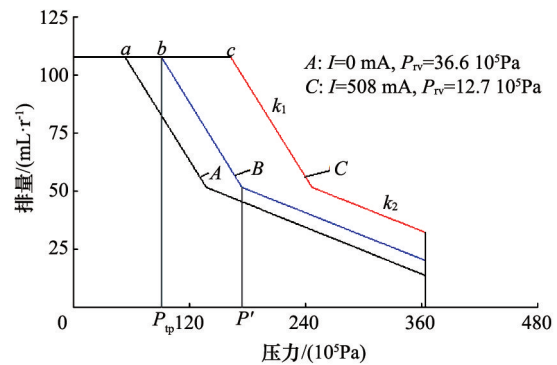


图 2 液压泵 P - q 特性曲线

Fig. 2 P - q external characteristic curve of hydraulic pump

在 K3V 系列电控变量泵中, 载荷柱塞面积 A_2 与 A_1 相等^[11]。泵排量开始变量时, 双泵工作压力 P_1 、 P_2 与减压阀输出压力 P_n 作用在载荷柱塞上的力等于弹簧 KA 的预紧力 F_p , 此时 $\Delta x_a = 0$ 、 $\Delta x_b = 0$, 将图 2 中点 a、点 c 的数据代入式(1), 可得 $A_1 = 0.22A_n$, 故泵在某一电比例减压阀的控制压力 P_n 下的起调压力 P_{tp} 为

$$P_{tp} = 23.62 - 4.65P_n \quad (2)$$

由图 2 可得出, 液压泵排量转折点处压力值 P' 为

$$P' = P_{tp} + 91.30 \quad (3)$$

根据泵的 P - q 特性曲线图及泵排量调节原理, 令 $P = (P_1 + P_2)/2$, 可以得到在某比例减压阀压力下泵的排量 q 与负载压力的关系表达式

$$q = \begin{cases} 105 & P \leq P_{tp} \\ 105 + 0.54(P_{tp} - P) & P_{tp} < P \leq P' \\ 55.70 + 0.20(P' - P) & P' < P \leq 370 \end{cases} \quad (4)$$

通过实测得到 15 组电磁比例减压阀输出压力值 P_n 与阀的通电流 I 的数据, 结果如图 3 中的点所示。

将电磁比例减压阀压力 P_n 与电流 I 的关系进行二次拟合得到图 3 所示曲线, 其数学表达式为

$$P_n = -0.000075I^2 - 0.00916I + 36.8472 \quad (5)$$

式中, P_n 的单位为 10^5 Pa, I 的单位为 mA。

泵的扭矩计算公式为

$$T_p = \frac{Pq}{2\pi\eta} \quad (6)$$

式中, η 为泵的总效率, 其受到排量与压力的影响, 效率特性如图 4 所示, 其中排量比定义为 q/q_{max} 。

泵 1、泵 2 的效率可由式(7)通过查表方式得到。

$$\eta = f(P, q) \quad (7)$$

考虑泵的响应特性, 在泵的流量输出环节增加一阶延迟环节^[12]:

$$y = \frac{1}{T_1 s + 1} \quad (8)$$

式中, T_1 为时间常数, s 为泵排量。

根据式(1)~式(8), 可得出泵的输入扭矩 T 关于负载压力

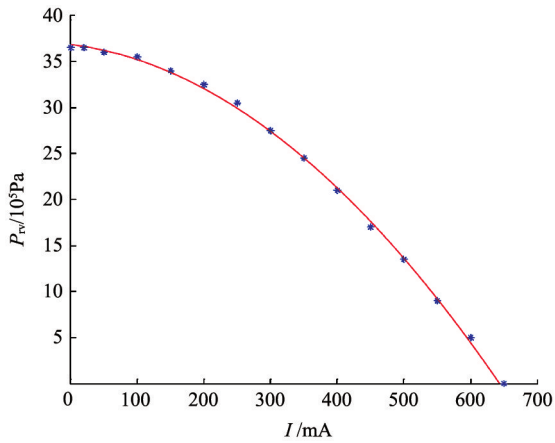


图3 电磁比例阀电流与压力关系

Fig. 3 Relationship between current and pressure of electromagnetic proportional valve

P_1, P_2 与减压阀电流 I 的 Simulink 模型如图5所示。

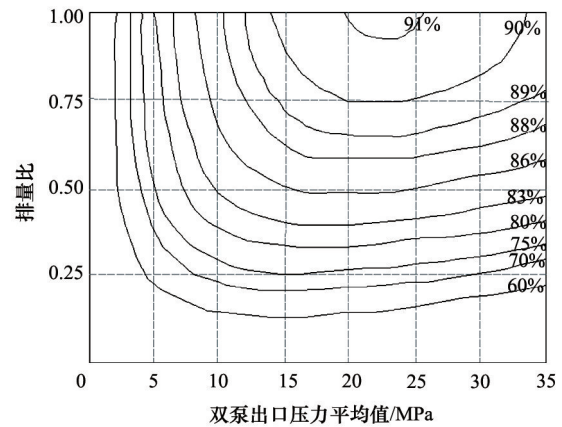


图4 液压主泵效率曲线

Fig. 4 Efficiency graph of hydraulic pump

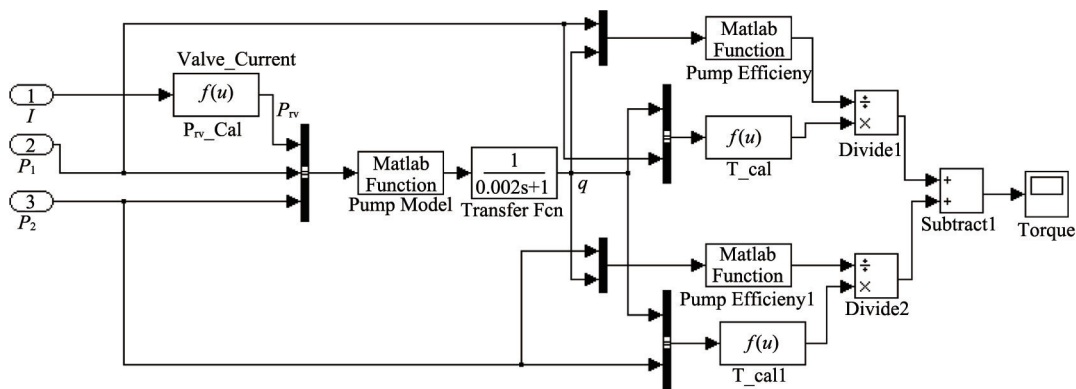


图5 液压泵的 Simulink 仿真图

Fig. 5 Simulation of hydraulic pump in Simulink

图5中 P_v_Cal 模块根据电磁比例减压电流值 I 计算出其输出压力 P_v , 之后 Pump Model 根据 P_1, P_2, P_v 计算出泵1与泵2各自的排量, 经过一阶延时环节后, 通过 Pump Efficiency 模块查询得到相对应的泵的总效率, 再通过 T_Cal 计算得到泵的输出扭矩, 最后将泵1、泵2的扭矩相加计算得到泵的总吸收扭矩。

2 柴油发动机的建模

本研究所采用的柴油发动机为五十铃公司的 CC-6BG1TRP 全程调速柴油机, 柴油发动机特性如图6所示, 其中 A, B 为外特性曲线, C, D, E 为调速特性曲线。

由于调速手柄位置下的调速特性曲线斜率相同, 因而各个调速手柄位置下柴油机的调速特性是关于调速手柄位置和转速的函数^[13]:

$$T_e = f(\alpha, n_e) \quad (9)$$

式中, T_e 为柴油机的输出扭矩 ($N \cdot m$); α 为调速手柄的相对位

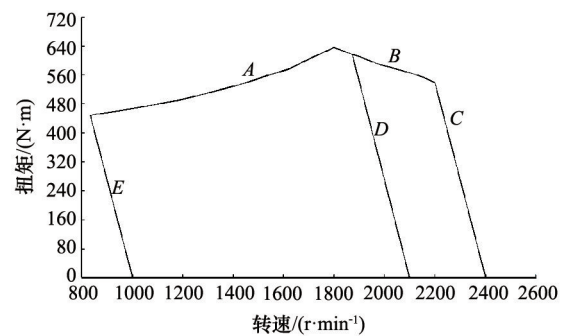


图6 柴油发动机特性曲线

Fig. 6 Engine performance characteristics

置 (%); T_e 为柴油发动机转速 (r/min)。

为了区分柴油发动机在外特性段与调速特性段的特点, 将外特性与调速特性曲线进行分段拟合, 外特性段 A 的二次拟合表达式为

$$T_c = 0.0002n_c^2 - 0.335n_c + 606 \quad (10)$$

外特性B的一次拟合表达式为

$$T_c = -0.2n_c + 980 \quad (11)$$

柴油发动机的调速特性方程可以用直线描述,由于不同油门拉杆位置下的调速特性斜率相同,可得到某油门拉杆位置下空载转速 n_d 为

$$n_d = 1400\alpha + 1000 \quad (12)$$

该油门拉杆位置下调速特性曲线D的扭矩计算式为

$$T_c = 6480 - 2.7n_c \quad (13)$$

柴油发动机系统是一个大惯性延时环节,其动态特性可用一阶惯性系统表示:

$$y = \frac{1}{T_2s + 1} \quad (14)$$

式中, T_2 为时间常数, s 为输入扭矩。

综合式(9)~式(14),在simulink仿真平台上搭建柴油发动机转速 n_c 关于油门电机位置 α 与扭矩 T_c 的柴油发动机的仿真模型(图7)。Engine Model通过式(12)、(13)计算得到柴油发动机转速 n_c ,经过一阶延时后即为柴油发动机的实际输出转速。

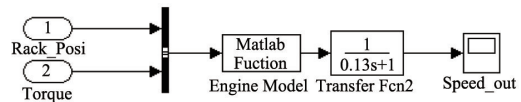


图7 柴油发动机系统Simulink仿真图

Fig. 7 Simulation of engine system in Simulink

3 发动机—泵匹配方法及控制策略

在挖掘机的功率匹配系统中,柴油发动机与液压泵的匹配是其重要的组成部分,当柴油发动机的工作点设置固定后,若泵的吸收功率过高,则会造成柴油发动机的工作点沿柴油发动机调速特性曲线或外特性曲线移动,使柴油发动机的转速下降,抗负载波动能力变弱以及燃油经济性能变差;而泵功率过低,则会浪费柴油发动机的输出功率,节能效果变差^[14]。因而合理配置泵的吸收功率,使泵的吸收功率等于柴油发动机的输出功率,对稳定柴油发动机转速以及实现挖掘机的节能控制具有重大意义。

当柴油发动机期望工作在某一最佳工作点时,其输出扭矩为一定值,所以泵在充分吸收柴油发动机的功率时,其功率应该无限趋近于柴油发动机的这个稳定工作点^[15],即需要满足 $T_c = T_p$ (图8)。

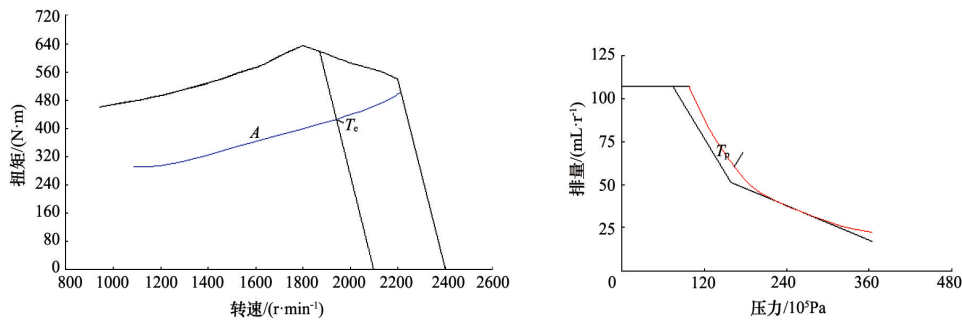


图8 发动机-液压泵匹配控制点设置

Fig. 8 Control point of engine-hydraulic pump power matching

如图8中所示,根据柴油发动机节能经济线A设置柴油发动机的在各个转速档位下的节能工作点,某空载转速下的节能工作点的扭矩为 T_c ,则挖掘机在工作过程中应实时调节液压泵的排量,使液压泵的扭矩 $T_p = T_c$ 。

为稳定柴油发动机的工作点,减小负载波动对柴油发动机转速的影响,改善柴油发动机的动力性与经济性,本研究采用了转速感应控制与柴油发动机恒负载输入控制相结合的方法。在外负载变化过程中,不断改变泵的吸收功率,使挖掘机功率匹配系统中泵到柴油发动机环节中泵的输出功率值为一恒定值。控制策略如图9所示。

当柴油发动机转速小于某油门位置下的设定转速 k 时,通过液压泵模型根据负载压力与式(6)计算液压泵作用在柴油发动机上的负载扭矩,将该扭矩与设定转速所对应的柴油发动机输出扭矩相比较,若负载过大,则表明作用在柴油发动机上的负载扭矩过大,此时减小电磁比例减压阀电流以降

低泵功率,防止负载过大引起柴油发动机的过大掉速;若负载较小,则增大阀电流以提高液压泵功率,充分吸收柴油发动机功率。当柴油发动机掉速超过 k 时,实行转速感应转制,对液压电磁比例减压阀进行PID控制,减小阀电流值,降低泵的功率使柴油发动机转速回升。

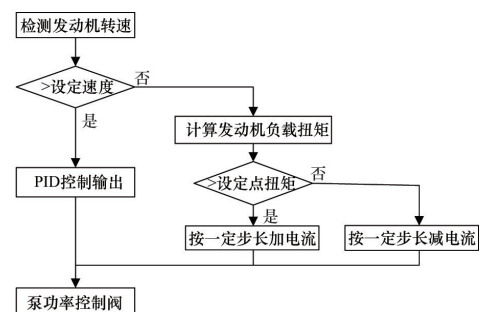


图9 转速控制流程

Fig. 9 Flow diagram of engine speed control

4 控制仿真分析

为了研究控制策略下柴油发动机转速控制的效果,本研

究将所建立的液压泵模型与柴油发动机模型按照所设定的控制策略搭建了基于Simulink的复合控制仿真模型(图10)。

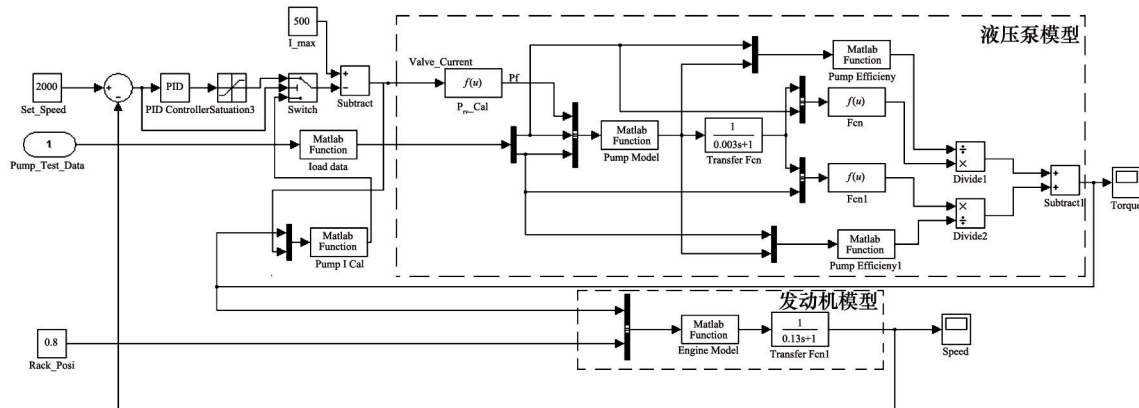


图10 复合控制仿真模型

Fig. 10 Diagram of composite control simulation model

当柴油发动机掉速小于设定值时,表明柴油发动机负载较小,此时由 Pump_I_Cal 模块计算电流值,进行恒扭矩控制;当柴油发动机掉速大于设定值时,表明此时柴油发动机负载大,此时停止恒扭矩控制,由 PID 模块计算电流值,进行转速感应控制。通过恒扭矩控制与转速感应控制的结合,从而实现液压挖掘机功率匹配的复合控制。将复合控制模型中的 Pump_I_Cal 去除,switch 只选择 PID 运算输出,使模型只执行转速 PID 控制,则模型可转化为纯转速感应 PID 控制仿真模型。

本研究将实际工况下的挖掘机作为研究对象,研究其在实际工况下的转速控制效果。实际工况下负载信号特征如图11所示。

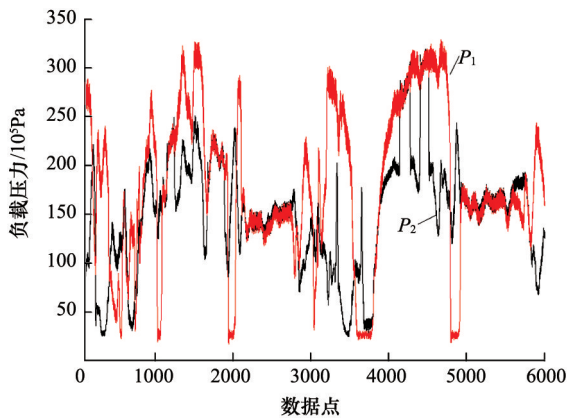


图11 负载压力信号

Fig. 11 Load pressure signal

仿真过程中,在 Simulink 仿真环境中分别进行复合控制仿真与转速感应 PID 控制仿真,把挖掘机在实际工作中的一段负载压力信号数据导入 Simulink 模型中,将其作为泵1与泵2的负载信号源输入,柴油发动机的油门开度设置为0.8,柴油发动机设定工作转速为2000 r/min。复合控制仿真过程

中,当实际转速大于设定转速时,模型中的 Pump I Cal 模块根据扭矩大小来对泵电流值进行控制,转速感应 PID 控制不起作用;当实际转速小于设定转速时,则只执行转速感应 PID 控制,从而实现复合控制的作用。进行转速感应 PID 控制仿真时,只执行转速 PID 控制。

单纯使用转速感应 PID 控制时,模型的仿真结果如图12所示。

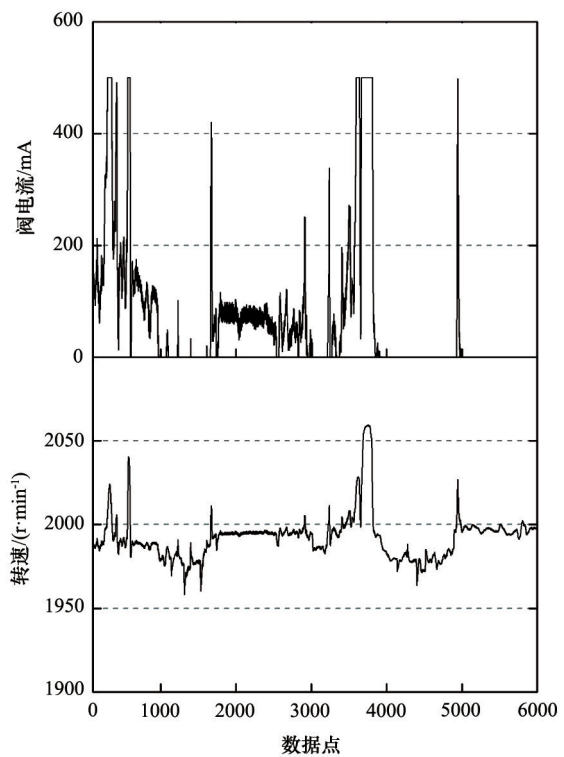


图12 转速感应PID控制的仿真结果

Fig. 12 Simulation results of rotary sensing PID control

使用复合控制时,模型的仿真结果如图13所示。

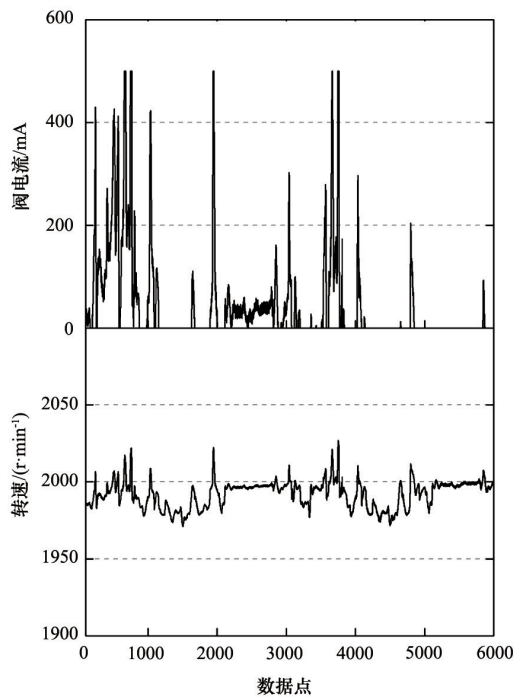


图 13 复合控制仿真结果

Fig. 13 Simulation results of the composite control

通过对比转速感应PID控制仿真结果图12与复合控制仿真结果图13可以看出:1)使用转速感应PID控制时,柴油发动机的最低速为1960 r/min;采用复合控制时柴油发动机最低速度为1972 r/min,因而复合控制过程中柴油发动机掉速量小,复合控制更能有效控制柴油发动机的掉速;2)转速感应PID控制过程中,柴油发动机的转速波动幅度较大,转速不稳定;在复合控制过程中,柴油发动机的转速基本在设定的转速2000 r/min附近,转速平稳,波动幅度小,因而复合控制可以更好地使柴油发动机转速稳定在设定工作点附近。

5 结论

通过搭建液压泵与柴油发动机的数学模型,在Simulink仿真平台上结合PID控制模块建立了功率匹配控制模型,分别对转速感应控制与柴油发动机恒扭矩控制+转速感应控制的方法做了仿真研究。将挖掘机实际工况下的负载信号导入仿真模型,对两种控制方法进行了仿真分析对比研究。结果表明:复合控制方法可以有效地稳定柴油发动机的转速,降低柴油发动机的掉速量,并且可以使液压泵能充分吸收柴油发动机的功率,减小柴油发动机功率的浪费。复合控制使得转速的波动幅度小,也提升了挖掘机的操作手感。

复合控制方法具有一定的通用性,可以应用到旋挖钻机、起重机等具有变负载特性的其他工程机械中去。

参考文献 (References)

[1] 郝鹏. 液压挖掘机动力系统匹配与节能控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
Hao Peng. Research on power match and energy saving control of

hydraulic excavator driving system[D]. Changsha: Central University, 2008.

- [2] 王昕, 赵丁选, 尚涛, 等. 基于单神经元的液压挖掘机自适应PID节能控制[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2005, 35(4): 377-340.
Wang Xin, Zhao DingXuan, Shang Tao, et al. Adaptive PID control for energy-saving of hydraulic excavator based on single neuron[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2005, 35(4): 377-340.
- [3] 张栋, 许纯新, 金立新, 等. 挖掘机神经元比例+积分+微分节能控制系统[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(5): 529-532.
Zhang Dong, Xu Chunxin, Jin Lisheng, et al. Research on energy saving control of hydraulic excavator based on self-adaptive single neuron proportion-integral-differential[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(5): 529-532.
- [4] 张栋. 基于功率匹配的挖掘机节能控制技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
Zhang Dong. Study on energy-saving technology of hydraulic excavator based on power match[D]. Changchun: Jilin University, 2005.
- [5] Manring N D, Johnson R E. Modeling and designing a variable displacement open loop pump[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2006, 12: 267-271.
- [6] 何清华, 郝鹏, 常毅华. 基于功率协调控制的液压挖掘机节能系统研究[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(2): 188-191.
He QingHua, Hao Peng, Chang Yihua. Energy-saving system for a hydraulic excavator based on the matching of constant power and variable power[J]. Mechanical Science and Technology, 2007, 26(2): 188-191.
- [7] 柳波, 孙东坡, 师辉宇. 发动机-变量泵极限负荷控制系统的设计与仿真[J]. 现代制造工程, 2009(4): 94-98.
Liu Bo, Sun Dongpo, Shi Huiyu. Design and simulation of load limit sensing control system for engine-variable pump system[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2009(4): 94-98.
- [8] 张万军. 柱塞泵总功率与负流量控制分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
Zhang WanJun. Analysis of total horsepower and negative flow control in axial piston pump[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [9] 童水光, 王相兵, 钟威, 等. 基于虚拟样机技术的轴向柱塞泵动态特性分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(2): 174-182.
Tong ShuiGuang, Wang Xiangbing, Zhong Wei, et al. Dynamic characteristics analysis on axial piston pump based on virtual prototype technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2): 174-182.
- [10] 黄新磊, 胡军科, 陈鹤梅, 等. 匹配发动机的液压泵复合式控制特性研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(9): 386-390.
Huang Xinlei, Hu Junke, Chen Hemei, et al. Study on combined control for matching hydraulic pumps to engine[J]. Computer Simulation, 2011, 28(9): 386-390.
- [11] 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, 2012.
Liu Xueliang. Study on power-matching control of the hydraulic excavator's power system[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [12] 杜常清, 颜伏伍, 李劲松, 等. 发动机性能测试及扭矩控制原型建立方法研究[J]. 内燃机工程, 2010, 31(1): 60-64.
Du Changqing, Yan Fuwu, Li Jinsong, et al. Engine performance testing and torque control prototype constructing[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(1): 60-64.
- [13] 王哲, 叶晓倩, 邓俊. 基于Matlab/Simulink的直线发动机性能仿真研究[J]. 内燃机工程, 2009, 30(1): 69-73.
Wang Zhe, Ye Xiaoqian, Deng Jun. A simulation analysis on free-piston engine based on Matlab/Simulink[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2009, 30(1): 69-73.
- [14] Eugeniusz B, Mirosław C, Witold G. Load-independent control of a hydraulic excavator[J]. Automation in Construction, 2008, 12: 245-254.
- [15] 牟春燕. 基于功率匹配的液压挖掘机节能模糊控制技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
Mou Chunyan. Study on energy-saving fuzzy control technology of hydraulic excavator based on power match[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.

(编辑 陈华姣)