

文章编号:1671-8879(2016)04-0111-08

基于双闭环 PID 的挖掘机发动机自学习控制方法

张 军¹, 陈思茹², 曹继项¹, 司癸卯¹, 张新荣¹, 张宏兵¹

(1. 长安大学 公路养护装备国家工程实验室, 陕西 西安 710064;

2. 陕西交通职业技术学院 经济管理系, 陕西 西安 710018)

摘 要:针对挖掘机分工况下各挡位转速的准确定位问题,以 21 t ZG3210-9 挖掘机为对象,以油门位置和发动机转速为反馈参数,提出了分工况下转速设定及其控制方法。用 Hersmor G16 控制器和线位移油门电机构建了挖掘机发动机控制系统,设计了基于 PID 的油门电机位置定位控制模型,建立了发动机转速控制的双闭环 PID 模型,并用极限控制和分段方法改进了转速控制模型,在试验样机上完成了发动机转速控制试验,并采用自行设计的基于 LabVIEW 的 CAN 总线监控系统对 PID 的控制参数进行了在线整定。研究表明:基于 PID 的油门电机控制系统稳定性好,油门电机的位置控制精度 $e_p \leq 0.5\%$,最优 PID 控制参数组合为 (5, 0.5, 0.6);采用双闭环 PID 方法可有效实现发动机转速自学习控制策略,在此基础上以误差为基础的分段式 PID 控制策略可缩减自学习时间和改进转速变化的平稳性,转速控制误差 $e_n \leq 10 \text{ r/min}$,发动机自学习总时间 $t < 60 \text{ s}$;建立了发动机油门位置与转速的线性控制模型,相关系数为 0.999,为后续挖掘机功率匹配的节能控制研究奠定了理论基础。

关键词:机械工程;挖掘机;节能控制;PID;发动机;油门电机

中图分类号:U415.511

文献标志码:A

Self-learning control method for engine rotate of excavator based on double closed-loop PID method

ZHANG Jun¹, CHEN Si-ru², CAO Ji-xiang¹, SI Gui-mao¹,

ZHANG Xin-rong¹, ZHANG Hong-bing¹

(1. National Engineering Laboratory for Highway Maintenance Equipment, Chang'an University, Xi'an 710064,

Shaanxi, China; 2. Department of Economics and Management, Shaanxi College of Communication

Technology, Xi'an 710018, Shaanxi, China)

Abstract: In order to solve the problems of positioning engine governor and engine speed for different working tasks, this paper analyzed a 21 t ZG3210-9 excavator and proposed engine speed setting and control method under different working tasks, taking position of throttle motor and engine speed as feedback parameters for control system. Hersmor G16 PLC controller and linear position feedback throttle motor were employed to construct the engine speed control system. Throttle motor position control model and engine speed control model were designed based on PID method and double closed-loop PID model for engine speed control was established. Output

收稿日期:2016-02-10

基金项目:中央高校教育教学改革专项经费资助项目(jgy16029);国家自然科学基金项目(51509006);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310825161008)

作者简介:张 军(1980-),男,四川广汉人,讲师,工学博士,E-mail:selfstudy@qq.com。

limit method was used to improve engine speed control model. Control experiment was carried on ZG3210-9 excavator, and an experiment parameter monitor system based on CAN bus and LabVIEW was used to monitor the control effect and tune three parameters of PID controller. The results show that motor control system has fast response speed and strong robustness. Position control accuracy of throttle motor e_p is less than 0.5%. The optimized PID parameters combination is (5,0.5,0.6). The double closed-loop PID method can realize the control function of positioning engine speed for different working tasks. On this basis, segment PID control strategy under different engine speed errors can significantly reduce control time and improve the stability of engine speed. The total engines study time t is less than 60 s and the engine speed accuracy e_n is less than 10 r/min. The relationship between throttle motor position and engine speed has good linearity, and its correlation coefficient is more than 0.999, which lays theoretical foundation for the further research of dynamic energy saving of excavator. 1 tab, 10 figs, 24 refs.

Key words: mechanical engineering; excavator; energy saving; PID; engine; throttle motor

0 引言

挖掘机是土方施工的主要工程机械,广泛用于建筑、公路和农田水利等工程中,由于工作过程中负载变化大,造成发动机功率与液压泵吸收功率不匹配,导致其能量利用率只有 30% 左右,因此节能控制成为挖掘机研究的热点^[1-2]。研究者大多从功率流分配上进行节能分析,以达到充分利用发动机功率的目标,主要集中在动力系统的功率匹配研究,根据负载变化动态调整液压系统的吸收功率,使得发动机输出功率与泵的功率匹配^[3-5]。如 CAT 提出的极限功率匹配方法,据此一些研究者以基于转速感应和 PID 控制(比例、积分、微分控制)方法来稳定转速,转速目标值依据发动机调速特性、油耗曲线和作业模式设定,高原地区应用还会增加大气压力反馈参数^[6-7]。由于机械系统的惯性,转速感应存在一定的滞后性。在此基础上,一些学者提出以压力为反馈参数快速感知液压系统负载变化,依据泵的 P - Q 特征曲线(P 为压力, Q 为排量),判断泵的吸收功率,调整液压系统吸收功率,同时以转速为参数修正液压系统的功率调整^[8-10]。这种方法提高了整机的经济性,但由于液压系统压力波动大,导致压力反馈实际控制效果不理想。另一些学者提出了混合动力控制策略,通过调控二次元件来稳定发动机转速,但目前混合动力还处于研究阶段,因此挖掘机节能控制核心仍然是稳定发动机转速,依赖于转速反馈,而发动机的控制模型影响节能性能^[11-16]。

中国挖掘机大多采用机械式发动机,转速通过油门电机调控,金立生等针对挖掘机油门电机的控

制提出了模糊 PID 方法,并进行了仿真试验验证^[17-18];岳耀亮提出了转速和油门位置双反馈控制策略,但现有研究大多集中在某些转速目标下的方法研究^[19]。为此,本文针对挖掘机分工况功率控制的多个挡位转速精确定位的需求,提出挖掘机发动机转速自学习方法和发动机转速控制方法,以发动机转速和油门电机位置为反馈参数,建立发动机转速的控制模型,解决分工况下转速快速精确定位的问题。

1 挖掘机发动机自学习控制原理

1.1 分工况功率设定方法

挖掘机的作业工况复杂,一般采用分工况策略,根据作业内容和整机性能将挖掘机设置为 10 挡功率,在此基础上设置液压系统的吸收功率和转速目标,分工况下各挡位调速特性如下页图 1 所示,其中最上方曲线为发动机的外特性曲线。由于发动机惯性大,油门响应迟缓,挖掘机作业时各挡位油门位置相对固定,只调整泵排量。根据作业载荷设定不同的功率模式,进一步设置 H(重载)、S(普通)和 L(轻载)3 个模式,若有破碎锤等辅助工作装置时,则根据功率和扭矩需求设置其对应工作所需的发动机转速挡位。为进一步节能,还设置自动怠速转速挡位。

1.2 分工况下转速自学习控制原理

在分工况下,控制系统需根据 10 挡转速目标标定对应的调速器位置,工作时就以标定后的油门位置点来定位转速。分工况下设定的转速是挖掘机处于无负荷下的转速,即各挡位下发动机调速特性曲

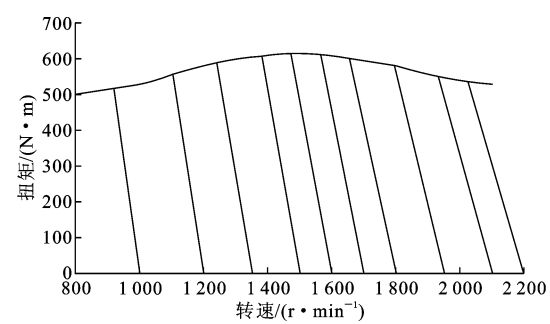


图 1 分工况下各挡位的发动机调速特性
Fig. 1 Governing characteristics of engine
at each throttle position

线上的最大转速值。发动机自学习就是根据分工况要求,标定油门电机及其控制模型参数,获得各挡位下对应的油门位置或调速器开度。控制目标是转速,被控制对象是油门电机,反馈参数为油门位置和转速,通过标定油门电机控制模型和发动机控制模型实现转速定位。

1.3 试验设备和方法

试验对象是中国国机重工的 21 t 中型挖掘机 ZG3210-9,发动机为康明斯 6BTA5.9-C(112 kW@1 950 r/min),在挖掘机处于无负荷状态下,进行油门电机和发动机的控制试验。

试验方法:①开展油门电机的控制试验,确定油门电机行程位置及其控制模型的相关参数;②无负荷状态下,控制发动机转速从最小值增大到最大值,确定发动机转速范围和油门电机行程范围,再控制发动机转速从大到小变化,以分工况下各挡位转速为目标,进行挖掘机发动机控制模型的参数整定试验,重复 3 次试验,取油门电机位置均值为目标位置;③利用搭建的 CAN 总线监控系统监控参数变化,用在线整定方法获得油门电机和发动机控制模型的参数。

2 挖掘机发动机控制系统设计

2.1 控制系统设计

输入量有带 10 挡挡位的油门旋钮、发动机转速和油门电机反馈位置,输出控制量包括油门电机的正反转及电机伸缩速度。故控制系统的输入输出量包括:①油门旋钮和电机的位置反馈量 2 个,其内部电阻变化范围为 0~10 kΩ,通过上拉 4.7 kΩ 电阻连接到 5 V 稳压电源将位置变化转换为 0~5 V 电压变化;②油门电机伸缩速度,用 1 个 PWM(脉冲宽度调制)端口控制油门电机伸缩速度来定位油门位置,用 1 个 DO(开关量输出)端口控制电机的伸

缩方向;③通过安装在飞轮上的磁电式传感器采集发动机转速,飞轮齿数为 127,用 1 个 PI(频率输入)端口进行计数;④为获得挖掘机整机参数和调试控制模型参数,采用 LabVIEW 和 CAN 总线构建控制系统的参数监控系统,通过 PEAK CAN 模块与控制系统通信。

控制系统的 I/O 需求为 2 个 AI(模拟量输入), 1 个 PI,1 个 DO 和 1 个 PWM,以及 1 个 CAN 口,为了后期扩展挖掘机整机控制系统,选用具有 56 个 I/O 复用资源的 Hersmor G16 为控制器,其中 AI 端口 AD 位数为 10 位,其内部设有上拉电阻,可直接测量电阻值;油门电机采用贵阳永清的线位移反馈式电机,控制系统原理如图 2 所示。

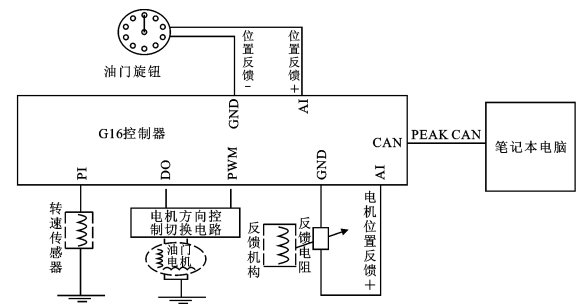


图 2 挖掘机发动机转速定位的控制电路
Fig. 2 Engine speed control circuit of excavator

2.2 控制变量关系确定

油门电机通过软轴与发动机油门调速器连接,如下页图 3 所示,调速器自带弹簧,若油门电机处于缩状态,软轴将在弹簧作用下复位,油门开度减小,因此发动机具有最小转速复位功能。油门电机的正反转带动软轴伸缩,控制调速器开口大小,从而调控发动机的转速大小。为保护发动机,在图 2 电路中设置油门电机方向控制端口 DO 得电且 PWM>PWM0(PWM0 为电机转动所需最小控制值,试验值为 500,PWM 值为 0~10 000)时,电机正转,调速器开口增大,发动机转速增大,设置最大转速的机械限位块;DO 失电且 PWM>PWM0,电机反转,调速器开口减小,发动机转速减小。为解决不同油门电机的位置反馈值在最大转速和最小转速下的差异,以油门电机位置千分比例值来度量转速,转速大小与电机转向和 PWM 值有关,电机正转时,PWM 越大,转速增大值越大,油门位置比例增大;反转时,PWM 越大,转速减小值越大,油门位置比例越小,因此,PWM 正比于转速目标差,油门电机转向决定转速增减方向,控制系统按照此关系来调控发动机。



图3 油门电机与发动机调速器连接

Fig. 3 Connection of speed governor and throttle motor

2.3 基于双闭环 PID 的发动机控制模型

工业控制中 PID、模糊 PID、神经网络及其交叉结合算法应用较多,考虑车载 PLC 控制器的容量和执行效率,PID 及其改进算法适合挖掘机发动机的控制,以转速和油门位置为反馈参数,油门电机为执行对象,挖掘机发动机控制模型如图 4 所示^[20-24]。

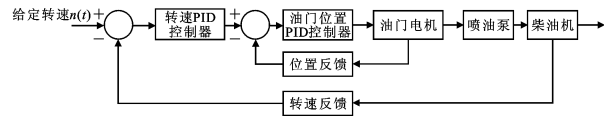


图4 挖掘机发动机转速自学习控制模型

Fig. 4 Self-learning control model for engine speed of excavator

PID 表达式为

$$G(s)=\frac{U(s)}{E(s)}=K_P(1+\frac{1}{T_I s}+T_D s) \tag{1}$$

式中: $G(s)$ 为 PID 传递函数; $U(s)$ 为输入; $E(s)$ 为误差; K_P 为比例系数; T_I 为积分时间; T_D 为微分时间。

为了应用在控制系统,用增量式 PID 法将式(1)进行数字化,有

$$\Delta u(k)=K_P[e(k)-e(k-1)]+K_I[e(k)-2e(k-1)+e(k-2)]+K_D[\Delta e(k)-\Delta e(k-1)] \tag{2}$$

式中: $e(k)$ 为第 k 个采样时刻的偏差; $\Delta u(k)$ 为第 k 时刻控制器计算输出的增量; K_I 为积分系数; K_D 为微分系数。

增量式 PID 控制效果与控制周期有关,控制周期过小,将造成控制器的运算负荷增大;控制周期过大,降低了 PID 动态控制能力,导致系统失去稳态性,因此需要根据被控对象响应特性选择合适的控制周期。

为保护发动机,在改进增量式 PID 算法基础上增加带死区和极限的控制策略,设置油门电机位置和发动机转速死区控制误差和每个控制周期下 PWM 控制增量最大值,改进的 PID 流程如图 5 所示。由于挖掘机转速范围(780~2 200 r/min)大,

为提高控制效率,可根据控制目标 $r(k)$ 与当前值 $c(k)$ 的误差 $e(k)$ 大小,进行分段 PID 控制,设置不同分段的误差大小和增量最大值,进一步提高控制速度和精度。

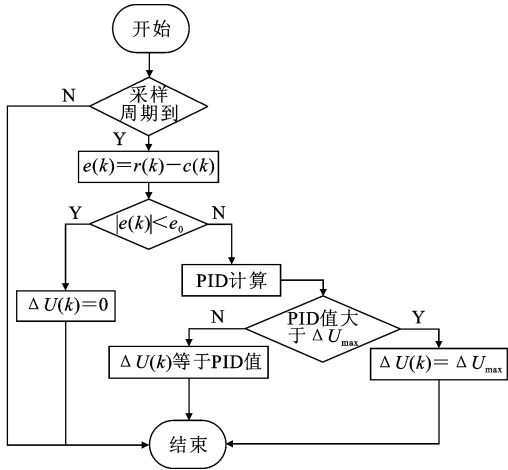


图5 带死区和增量限制的增量式 PID 控制方法

Fig. 5 Increment PID control method with dead zone and maximum increment limit

3 挖掘机发动机控制试验

根据挖掘机发动机和油门电机的特性,PID 控制周期设为 50 ms;CAN 通信波特率为 250 kbps,CAN 发送间隔为 100 ms。转速控制试验时,挖掘机处于无负荷状态,转速从最小增长到最大,然后转速逐渐减小,完成各挡位转速目标的参数标定。

3.1 油门电机定位试验

油门电机靠近液压泵一侧,通过软轴连接到发动机油门,下页图 6 中的软轴即为图 3 中的软轴另一侧,电机的电源控制线和位置反馈线分别与 PLC 的 PWM 和 AI 端口连接。

在挖掘机发动机未启动时,进行油门电机的定位控制试验,结果表明试验用油门电机全行程的 AD(模拟量数值)值变化范围为 0~610。考虑到不同油门电机的行程范围不同,为能建立统一的控制方法,将发动机从最小转速到最大转速所测量的电机位置反馈的 AD 值量化为 0~1 000 的千分比数。在油门电机位置环 PID 算法中设置其死区误差为 5 (即 0.5%),PWM 每个控制周期增量最大值为 1 500(即 15%,PWM 最大值为 10 000),设置油门控制目标,根据 K_P 、 K_I 和 K_D 各自特点,在线整定试验调整油门电机位置环的 PID 参数,控制试验结果如下页图 7 所示。图中位置反馈值是通过 CAN 总线按 100 ms 间隔发送,并不是按照采样间隔发

(a) 电机连接方式

(b) 调试现场

图 6 发动机控制试验系统

Fig. 6 Control experiment system of engine

送,其结果可满足控制系统的 PID 参数整定要求。

通过在线参数整定发现, K_P 过大易超调; K_D 过大加快上升时间, 易超调; K_I 过大存在超调和回复慢的缺点。试验对比油门位置反馈曲线确定 PID 参数的组合, 发现油门位置电机的 PID 控制具有较好的鲁棒性, PID 参数有多种组合均能满足快速准确定位油门位置, 试验结果见图 7(d), 可控制油门电机快速执行到位, 根据多个目标位置的综合对比试验, 确定油门电机位置 PID 控制参数组合为 (5, 0.5, 0.6)。

3.2 分工况下发动机转速自学习试验

发动机转速自学习需要自动标定 10 个挡位和 1 个自动怠速转速(一般将自动怠速转速与 3 挡转速设为一致),在确定油门位置环的基础上整定发动机转速环的 PID 参数。考虑转速目标是在调速器最大和最小转速范围内,因此标定模型前需要确定发动机的上下限转速,再按转速目标进行转速自学习控制试验,避免发动机飞车。

油门电机内部是涡轮蜗杆结构,齿间存在一定间隙,造成一定的误差。根据发动机特点,设定转速死区误差为 10 r/min,设置油门位置比例最大增量

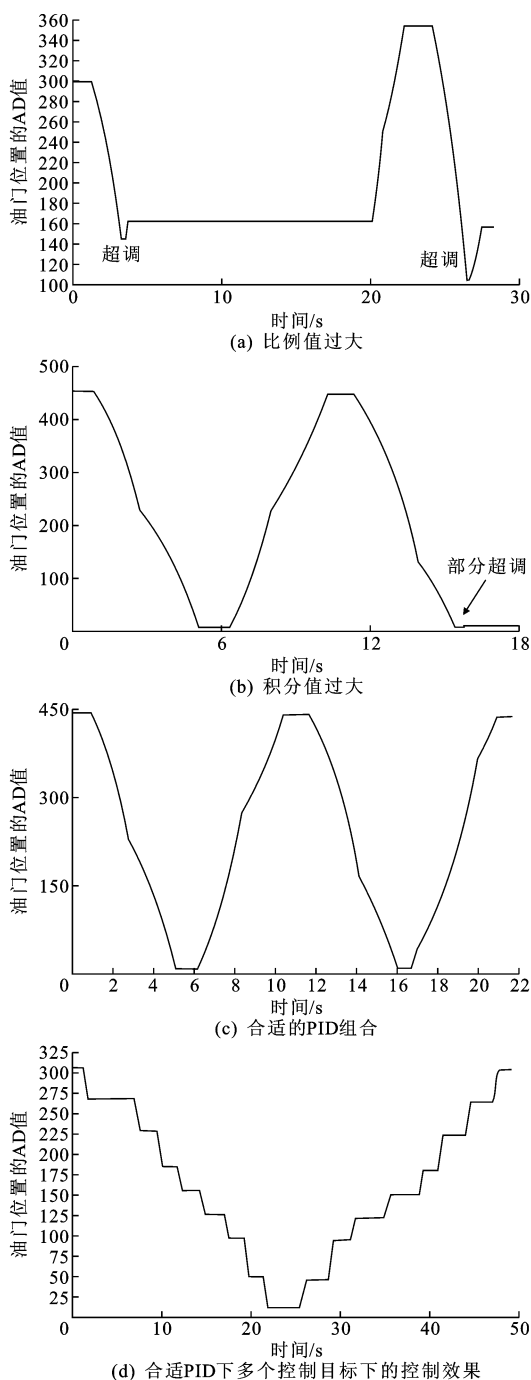


图 7 油门电机的 PID 参数调整结果

Fig. 7 Results of throttle position PID parameter adjust

值为 15%,对转速环 PID 进行参数在线整定。

考虑到不同挡位下的转速相差较大,试验发现转速环在全程不分段 PID 控制下,发动机转速自学习耗时一般为 200 s,且转速波动大,对发动机有损伤。为此,进一步细分 PID 控制方法,根据目标转速误差是否大于 50 r/min 进行 2 段控制:粗控范围,死区误差设为 25 r/m;精细控制,死区误差设为 10 r/min。下页图 8 为分段改进的双闭环 PID 控制效果,整个学习过程小于 60 s,转速波动小,大大改

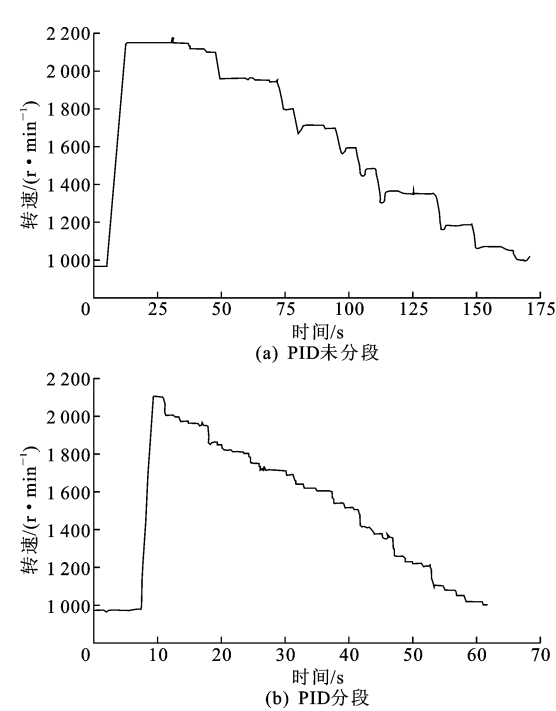


图 8 基于转速和位置反馈的分段式 PID 控制发动机自学习结果
Fig. 8 Engine self-learning results based on speed and throttle position with segment-PID method

进了双闭环 PID 的执行效率。

3.3 油门电机与发动机转速关系

表 1 为设定的转速目标和试验标定所得结果。设置的 10 挡转速分别为 1 050、1 200、1 350、1 500、1 600、1 700、1 800、1 950、2 100、2 200 r/min,试验用的发动机油门调速器位置未调整,转速范围为 980~2 086 r/min。发动机不能达到设置的第 9 挡和第 10 挡转速,发动机自学习控制系统考虑了发动机的差异,即最大、最小设定转速与发动机实际转速不一致时,以发动机的极限最大和最小目标为学习目标进行标定。由表 1 可知,挖掘机发动机控制的综合误差最大为 8 r/min,在死区误差 10 r/min

表 1 发动机自学习标定结果

Tab. 1 Engine speed control results

挡位	目标转速	试验 1	试验 2	试验 3	均值	误差
1	1 050	1 048	1 056	1 048	1 051	-1
2	1 200	1 196	1 201	1 204	1 200	0
3	1 350	1 360	1 355	1 360	1 358	-8
4	1 500	1 503	1 509	1 503	1 505	-5
5	1 600	1 605	1 607	1 608	1 607	-7
6	1 700	1 707	1 703	1 705	1 705	-5
7	1 800	1 799	1 802	1 795	1 799	1
8	1 950	1 953	1 957	1 955	1 955	-5
9	2 090	2 081	2 089	2 084	2 085	5
10	2 090	2 083	2 092	2 088	2 088	2

以内,基于转速和油门位置的反馈模型达到了控制精度。这些标定的油门位置为各油门挡位工作的执行目标。

图 9 表示发动机自学习后发动机转速与油门位置的关系。图中多增加了一最低转速极限点,可见发动机油门位置与发动机转速线性相关程度高,相关系数达到 0.999,因此,10 挡油门旋钮也可改成无极油门旋钮进行调速。根据油门位置可估算发动机的转速及其功率,相应调整挖掘机液压系统对应的吸收扭矩和功率,可为挖掘机发动机与负载动态匹配,动态功率匹配调整提供变功率调控基础。

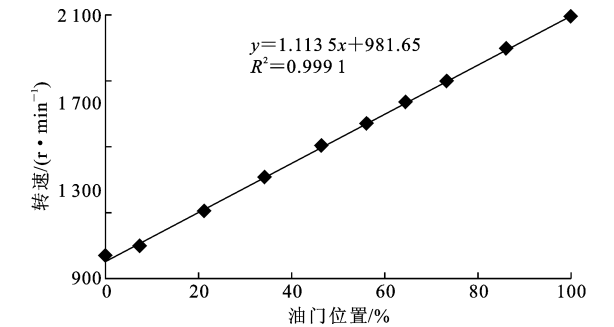


图 9 油门位置与发动机转速的关系
Fig. 9 Relationship between throttle position and engine speed

图 10 表示在油门旋钮动作下发动机转速的跟随试验。试验发现同一挡位的转速上升与下降的实际控制转速存在一定的差异,但差异在目标转速的误差带内。主要原因是油门电机涡轮蜗杆的正反转间隙不同,若进一步提高控制精度,需要标定上升油门挡位和下降油门挡位,从而同一挡位的油门位置存在转速上升和下降 2 个目标,才能进一步提高控制精度。

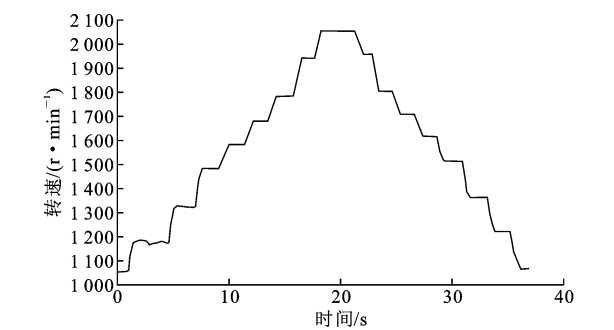


图 10 分工况挡位下电机正反转与发动机转速的关系
Fig. 10 Relationship between engine speed and throttle switch under different working tasks

4 结 语

(1)针对挖掘机分工况的策略,提出了挖掘机发动机自学习控制方法,以转速和油门位置为反馈参

数,用G16控制器、线性油门电机构建了1套挖掘机发动机控制系统。

(2)采用PWM调整油门电机伸缩速度和PID的控制方法构建了油门电机控制系统,系统响应快,鲁棒性好,位置控制精度 $e_p \leq 0.5\%$,PID参数的最佳组合为(5,0.5,0.6)。

(3)以分段式和带极限控制的PID方法改进了发动机自学习控制模型,提高了系统响应和精度,分工况下自学习耗时从200 s减少到60 s,转速控制误差 $e_n \leq 10$ r/min。

(4)建立了发动机转速与油门电机的线性模型,相关系数达到0.999,解决了不同油门电机行程不一致、发动机转速学习目标不一致的问题,为动态调整发动机功率的控制方法打下了基础。

(5)本文未对挖掘机动态功率匹配的调控策略进行分析,后期可结合发动机和泵的特性曲线,以转速和负载压力为反馈参数,采用PID控制策略,深入探究挖掘机的节能控制策略,进一步提高挖掘机的节能性能。

参考文献:

References:

- [1] 张 军,焦生杰,顾海荣,等.基于电喷发动机的挖掘机控制系统设计[J].中国工程机械学报,2013,11(1):59-64.
ZHANG Jun,JIAO Sheng-jie,GU Hai-rong,et al. Excavator electronic control system design for electronic fuel injection engines[J]. Chinese Journal of Construction Machinery,2013,11(1):59-64. (in Chinese)
- [2] ZHANG J,JIAO S J,LIAO X M,et al. Design of intelligent hydraulic excavator control system based on PID method[J]. Computer and Computing Technologies in Agriculture III,2010,317:207-215.
- [3] 贺雨田,吕彭民,牛选平.大型液压挖掘机工作装置结构有限元分析[J].筑路机械与施工机械化,2016,33(1):102-105.
HE Yu-tian,LU Peng-min,NIU Xuan-ping. Finite element analysis of working device of large-sized hydraulic excavator[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2016,33(1):102-105. (in Chinese)
- [4] 杨世平,余 浩,刘金刚,等.液压挖掘机动力系统功率匹配及其节能控制[J].机械工程学报,2014,50(5):152-160.
YANG Shi-ping,YU Hao,LIU Jin-gang,et al. Research on power matching and energy saving control of power system in hydraulic excavator[J]. Journal of

Mechanical Engineering,2014,50(5):152-160. (in Chinese)

- [5] 刘学良,龚 进,邓 宇,等.挖掘机功率匹配测试系统研究与设计[J].仪表技术与传感器,2012(12):64-66.
LIU Xue-liang,GONG Jin,DENG Yu,et al. Research and design of power match testing system in hydraulic excavator[J]. Instrument Technique & Sensor,2012(12):64-66. (in Chinese)
- [6] 赵丁选,尚 涛,张红彦,等.液压挖掘机模糊节能控制策略及实验研究[J].中国机械工程,2006,17(2):177-179.
ZHAO Ding-xuan,SHANG Tao,ZHANG Hong-yan,et al. Study on planning and testing for fuzzy saving control of a hydraulic excavator[J]. China Mechanical Engineering,2006,17(2):177-179. (in Chinese)
- [7] 孔庆祥.挖掘机极限功率匹配系统的建模仿真及实验研究[D].济南:山东大学,2014.
KONG Qing-xiang. Research on simulation and experiment of the ultimate power matching system for the excavator[D]. Jinan: Shandong University,2014. (in Chinese)
- [8] 吴 帆,毛闻雯,唐 进.基于转速压力双闭环控制的挖掘机全局功率匹配节能系统设计[J].建筑机械,2012(7):75-80.
WU Fan,MAO Wen-wen,TANG Jin. Excavator global power matching saving system design based on speed-pressure dual closed loop control[J]. Construction Machinery,2012(7):75-80. (in Chinese)
- [9] 陈月春,曾育平,李 耀.静压传动车辆的功率匹配节能控制研究[J].液压与气动,2010(3):4-5.
CHEN Yue-chun,ZENG Yu-ping,LI Yao. The research on power-matching control strategy of energy saving for hydrostatic transmission vehicle [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics,2010(3):4-5. (in Chinese)
- [10] 徐 淼,赵丁选,倪 涛,等.基于最小二乘支持向量机的混合动力挖掘机负载功率预测[J].吉林大学学报:工学版,2015,45(1):133-138.
XU Miao,ZHAO Ding-xuan,NI Tao,et al. Load prediction of hybrid excavator based on least square support vector machine[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition,2015,45(1):133-138. (in Chinese)
- [11] 管 成,王 飞,解泽哲,等.功率差值补偿式挖掘机液压混合动力系统[J].浙江大学学报:工学版,2015,49(5):813-820.
GUAN Cheng,WANG Fei,XIE Ze-zhe,et al. Excava-

- tor hydraulic hybrid system based on differential power compensation[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2015, 49(5): 813-820. (in Chinese)
- [12] KIM H G, YOO S J, CHO S W, et al. Hybrid control algorithm for fuel consumption of a compound hybrid excavator[J]. Automation in Construction, 2016, 68: 1-10.
- [13] LIN T L, HUANG W P, REN H L, et al. New compound energy regeneration system and control strategy for hybrid hydraulic excavators[J]. Automation in Construction, 2016, 68: 11-20.
- [14] 赵丁选, 陈明东, 戴群亮, 等. 油液混合动力液压挖掘机动臂势能回收系统[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(增 1): 150-154.
- ZHAO Ding-xuan, CHEN Ming-dong, DAI Qun-liang, et al. System of arm potential energy recovery in hybrid hydraulic excavators[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(S1): 150-154. (in Chinese)
- [15] 王 飞, 管 成, 肖 扬, 等. 挖掘机动臂势能回收系统的压力滑模控制[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2016, 50(2): 201-208.
- WANG Fei, GUAN Chen, XIAO Yang, et al. Pressure sliding mode control of hydraulic excavator boom potential energy recovery[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2016, 50(2): 201-208. (in Chinese)
- [16] 张 军, 焦生杰, 叶 敏, 等. 基于双闭环 PID 的挖掘机泵扭矩控制策略[J]. 中国工程机械学报, 2012, 10(3): 316-320.
- ZHANG Jun, JIAO Sheng-jie, YE Min, et al. Torque control strategy for double-closed-loop PID-based excavator pumps[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2012, 10(3): 316-320. (in Chinese)
- [17] 金立生, 赵丁选, 丁德胜, 等. 液压挖掘机节能参数自适应模糊 PID 控制器研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 87-90.
- JIN Li-sheng, ZHAO Ding-xuan, DING De-sheng, et al. Energy-saving PID fuzzy controller with self-tuning parameters of hydraulic excavator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(6): 87-90. (in Chinese)
- [18] 金立生, 赵丁选, 黄运华, 等. 液压挖掘机节能油门模糊控制器的开发研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(1): 119-122.
- JIN Li-sheng, ZHAO Ding-xuan, HUANG Yun-hua, et al. Study of the accelerograph fuzzy controller of hydraulic excavator saving energy[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 119-122. (in Chinese)
- [19] 岳耀亮. 液压挖掘机节能计算机控制系统研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
- YUE Yao-liang. Energy-saving hydraulic excavator computer control system[D]. Jinan: Shandong University, 2008. (in Chinese)
- [20] 赵铁栓, 焦生杰, 叶 敏. 振动压路机无级调幅 H_2/H_∞ 控制[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(3): 87-92.
- ZHAO Tie-shuan, JIAO Sheng-jie, YE Min. H_2/H_∞ control for stepless amplitude modulation of vibratory roller[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(3): 87-92. (in Chinese)
- [21] 房怀英, 杨建红, 吴仕平. 基于模糊 PID 控制沥青砂浆车液压调平系统[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(1): 98-101.
- FANG Huai-ying, YANG Jian-hong, WU Shi-ping. Hydraulic leveling system for asphalt mortar vehicle based on fuzzy PID control strategy[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(1): 98-101. (in Chinese)
- [22] 王海飞, 周忠华, 罗开迪. 基于 PID 控制算法的机场运输车转向系统设计[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(6): 94-99.
- WANG Hai-fei, ZHOU Zhong-hua, LUO Kai-di. Design for steering system of airport transporters based on PID control algorithm[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(6): 94-99. (in Chinese)
- [23] 马登成, 杨士敏, 胡永彪, 等. 试验台转速控制系统动态性能仿真[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(4): 98-101.
- MA Deng-cheng, YANG Shi-min, HU Yong-biao, et al. Dynamic characteristics simulation of test platform speed control system[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(4): 98-101. (in Chinese)
- [24] 罗文军, 罗天洪, 甘信富. 基于模糊-Pi 控制的沥青混凝土摊铺机行驶系统仿真[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(1): 101-107.
- LUO Wen-jun, LUO Tian-hong, GAN Xin-fu. Traveling system simulation of asphalt-cement paver based on fuzzy-Pi dual-mode control [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(1): 101-107. (in Chinese)