

文章编号:1672-9331(2021)04-0089-11

基于 MATLAB/AMESim 的精密整平作业车 调平液压系统控制算法联合仿真

张 新,郭靖文

(长沙理工大学 汽车与机械工程学院,湖南 长沙 410114)

摘 要: 地铁轨道建设对于城市交通具有重要意义,而现有市场上没有用于隧道施工作业的精密整平作业车,因此设计一种精密整平作业车调平液压系统控制算法,用以降低工人劳动强度,提高路面平整度和施工效率;对精密整平作业车调平液压系统进行 AMESim 参数化建模,在 MATLAB 中设计 Fuzzy-PID 及滑模变结构控制算法对调平系统模型进行对比控制;根据调平系统液压缸活塞杆位移精度、活塞杆跟踪所需时间、调平油缸压力变化、调平油缸流量变化等参数,利用传统 PID、Fuzzy-PID 和滑模变结构控制 3 种算法进行仿真对比。结果显示:当出现不确定的外来干扰时,与其他算法相比,Fuzzy-PID 算法在参数整定优良的情况下在系统的稳定性、调平精度、调平时间上均具有较大的优势。

关键词: 调平液压系统;MATLAB/AMESim 联合仿真;Fuzzy-PID;滑模变结构控制;PID

中图分类号: TP273+.4

文献标志码: A

Co-simulation of control algorithm for leveling hydraulic system of precision leveling vehicle based on MATLAB/AMESim

ZHANG Xin, GUO JING-wen

(School of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Subway track construction is of great significance to urban traffic. There are no precise leveling vehicles for tunnel construction in the existing market, so a control algorithm for leveling hydraulic system of precision leveling vehicle was designed to reduce workers' labor intensity, improve pavement evenness and enhance construction efficiency. The AMESim parametric modeling of the leveling hydraulic system of the precision leveling vehicle was carried out to design Fuzzy-PID algorithm and sliding mode variable structure control algorithm in MATLAB, which were used to compare and control the leveling system model. According to the leveling system hydraulic cylinder piston rod displacement accuracy, piston rod tracking time, leveling cylinder pressure change, leveling cylinder flow change and other parameters, the three algorithms including traditional PID, Fuzzy-PID and sliding mode variable structure control algorithm were simulated and compared. The results show that in the presence of uncertain external interference, compared with other algorithms, Fuzzy-PID algorithm has great advantages in system stability, leveling accuracy and

收稿日期:2021-05-12

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2016JJ2003)

通讯作者:张 新(1966—),男,教授,主要从事汽车主动安全与工程车辆开发方面的研究。E-mail:zxzbzjy@sina.com

leveling time under the condition of excellent parameter setting.

Key words: leveling hydraulic system; MATLAB/AMESim co-simulation; Fuzzy-PID; sliding mode variable structure control; PID

地铁建设对城市交通有着重要的意义,有助于提升城市的交通能力,对城市的空间形态发挥着导向作用^[1]。地铁轨道的规划需要兼顾经济及社会效益。近年来,我国地铁建设项目的数量持续增长,中小城市也开始进行相关项目的筹措规划。轨道是列车运行的基础,轨道的施工建设是地铁工程的重要组成部分,其社会及经济意义重大^[2]。因此,设计一种用于地铁隧道混凝土路面整平的机械尤为重要。

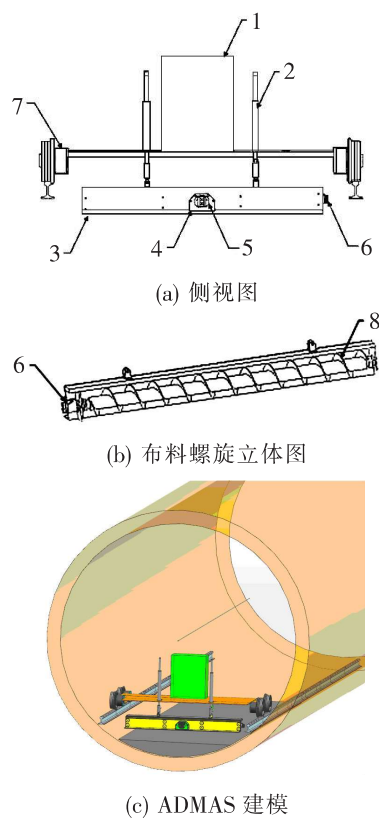
液压控制系统所要控制的对象具有非线性、时变性、不确定性、不完全性以及复杂的特点,因而建立精准的系统控制模型难度较大^[3-6]。控制模型的精准度及严密度对系统控制特性的影响较大,若仅用常规的控制理论构建模型,将会影响控制效果。模糊 PID 控制对于数学模型的准确性没有硬性的要求^[7],且在伺服控制上表现优异并被广泛使用^[8];滑模变结构控制需要对 AMESim 中电液比例方向阀的模型参数进行辨识,然后再进行 MATLAB/AMESim 联合仿真;而对于传统 PID,只需在 AMESim 中就可以完成算法的构建与仿真。

因此,本研究在设计完成精密整平作业车调平液压系统的原理之后,在 MATLAB 中设计了两不同的控制算法,然后将 MATLAB 算法模块导入 AMESim,利用 MATLAB 数据处理的优势及 AMESim 调平系统建模精确度的优势进行 MATLAB/AMESim 联合仿真,这样可以观测到每个时刻的仿真数据,进而可以获得高精度的仿真结果,这对调平系统动态性能的分析十分有利。

1 精密整平作业车的结构及液压系统原理

1.1 精密整平作业车的结构

精密整平作业车作为整平机设计的基础,其设计的好坏将直接影响施工质量。在施工过程中,需要利用精密整平作业车对地铁隧道路面的纵、横坡进行修整。精密整平作业车的结构如图 1 所示。



1.液压泵站与动力控制器总成;2.调平油缸;3.振捣板;4.偏心振捣机构;5.振捣液压马达;6.布料螺旋液压马达;7.轮轨走行伺服电机;8.布料螺旋

图 1 精密整平作业车示意图

Fig. 1 Schematic diagram of precision leveling vehicle

1.2 液压系统原理

在精密整平作业车的工作过程中,混凝土的压实工作依靠振捣机构来完成^[9]。在振捣板的移动过程中,需要考虑液压系统自重产生的压力,若压力过大,会缩短调平系统的使用寿命;若压力过小,调平系统的精度达不到要求。因此,需要对液压系统自重产生的压力提出要求,以确保系统具有良好的安全性和稳定性^[10]。整平作业车调平液压系统的结构较简单,具有良好的过载保护能力,可在一定程度上避免气蚀,动力性能较好。在液压系统回路中,液压油泵是动力源,也是主要的控制元件,由恒压油泵供油,因而油压相对较稳定。通过调定调平液压系统溢流阀的开启压力,可以避免运行期间调平液压系统发生载荷超标的情况,且溢流阀能控制调平液压系统的最大压力。液压系统的工作原理为:在负载不断增大的情况

下,系统压力逐渐增大,直至达到溢流阀所设定的最大值,此时溢流阀开启,液压油通过溢流阀后直接回流入油缸,将系统压力维持在预定值范围内。

根据精密整平作业车调平系统的工作原理,综合考虑上述因素,精密整平作业车调平液压系统主要由如下液压元件构成:油箱、电机、滤清器、散热器、蓄能器、溢流阀、两位二通换向阀、三位四通换向阀、节流孔、对称油缸。按照液压系统原理图的绘制原则,在 AMESim 中对精密整平作业车调平系统进行建模,如图 2 所示。

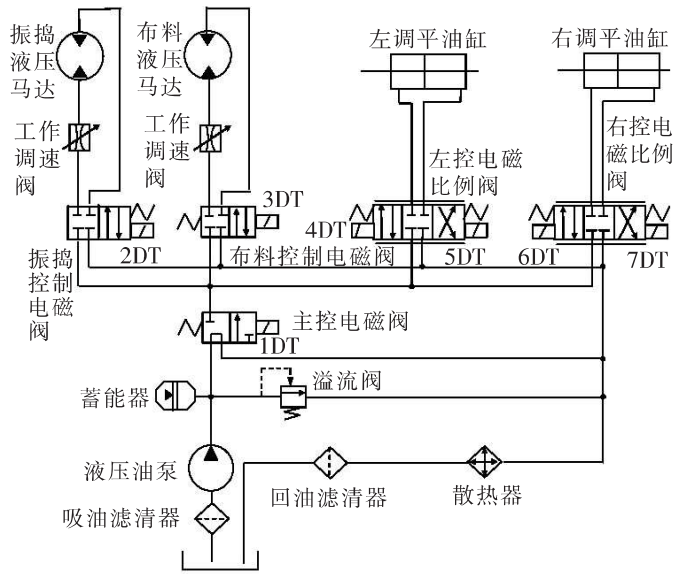


图 2 精密整平作业车调平液压系统原理图

Fig. 2 Principle diagram of leveling hydraulic system of precision leveling vehicle

2 调平液压系统 Fuzzy-PID 及滑模变结构控制参数的设计

2.1 调平液压系统 Fuzzy-PID 控制器的设计

根据电液调平控制设计原则与系统的结构规划,本研究制定了 Fuzzy-PID 参数自整定电液调平系统的总体设计方案(图 2)。在总体的液压调平控制系统中,以 ARM 公司生产的 STM32F103 系列单片机为核心控制器,由磁致伸缩位移传感器采集振捣板位移数据,并经 RS485 线得到数字量,然后将其输入到 STM32 中进行后处理。经 STM32 中的控制算法模块得到 PWM 信号,并将其输出给电液比例阀以控制调平油缸活塞杆的位移,最终起到精确控制振捣板实时位置的作用。

在 PID 控制器控制原理的基础上设计 Fuzzy-PID 控制器^[11],其原理结构图见图 3。

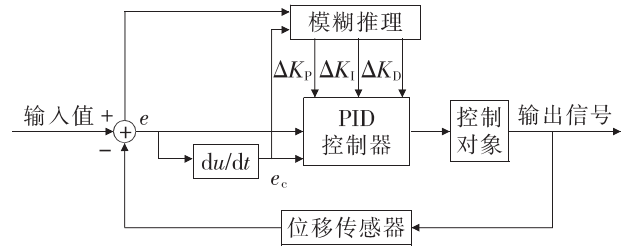


图 3 Fuzzy-PID 控制原理结构图

Fig. 3 Structure diagram of control principle of Fuzzy-PID

Fuzzy-PID 控制器的设计步骤如下:

1) 在本研究设计的调平系统中,设定系统的输入变量为液压缸活塞实际位移偏差 $y(t)$ 与理想位移偏差(设定值) $r(t)$ 之间的差值 e 及其变化率 e_c ,而 PID 的系数 K_P, K_I, K_D 及其增量 $\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$ 为输出值。

2) 确定 $e, e_c, \Delta K_P, \Delta K_I$ 以及 ΔK_D 的实际论域。例如: e 为活塞杆的位移差值,将其按实际数据设定为 $-0.2 \sim 0.2$ m; e_c 为位移的差值变化率,实际上即为活塞杆运动速度,将其设置为 $-0.4 \sim 0.4$ m/s。计算模糊量化因子及比例因子等参数,转换论域,得到离散论域上 $e, e_c, \Delta k_P, \Delta k_I, \Delta k_D$ 的输入、输出值。

在模糊控制过程中,要将基本论域设定为实际精确量,并对此精确量进行模糊化处理,所以要将活塞杆位移 e 由基本论域转换至对应的模糊集论域,然后求解量化因子^[12]。

如果要保证 Fuzzy-PID 达到预期的控制精度,需要一套合理并且行之有效的控制规则。因此,要合理处理以及确定量化因子。据相关研究成果,在模糊控制器的规划中,量化因子、比例因子的设置以及量化因子的大小对模糊控制的精度和速度(即鲁棒性)都有很大的影响。

量化因子,即模糊控制器中输入与输出的比例系数,可体现模糊论域和基本论域的比例关系,通常用 K 表示。如果误差的基本论域为 $[-x_e, x_e]$,误差变化的基本论域为 $[-x_{e_c}, x_{e_c}]$,误差与误差变化的模糊论域分别为 $[-n, n], [-m, m]$,则量化因子和比例因子分别为:

$$K_e = \frac{n}{x_e} \quad (1)$$

$$K_{e_c} = \frac{m}{x_{e_c}} \quad (2)$$

在本研究中将比例因子、量化因子均设置为1, e 和 e_c 的论域分别为 $\{-0.2, -0.133\ 3, -0.066\ 67, 0, 0.066\ 67, 0.133\ 3, 0.2\}$ 和 $\{-0.4, -0.266\ 7, -0.133\ 3, 0, 0.133\ 3, 0.266\ 7, 0.4\}$, $\Delta k_P, \Delta k_I, \Delta k_D$ 的论域分别为 $\{-5\ 000, -3\ 333, -1\ 667, 0, 1\ 667, 3\ 333, 5\ 000\}$, $\{-200, -133.3, -66.67, 0, 66.67, 133.3, 200\}$ 和 $\{-200, -133.3, -66.67, 0, 66.67, 133.3, 200\}$ 。

3) 设置隶属度函数。将电液调平控制系统中调平油缸的调平位置误差 e 、速率 e_c 以及 PID 中增量 $\Delta k_P, \Delta k_I, \Delta k_D$ 的模糊控制集合定义为 $\{PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB\}$ 。在设置隶属度函数时需用相应的自然语言变量。在 MATLAB 中建立的隶属度函数如图 4~8 所示。

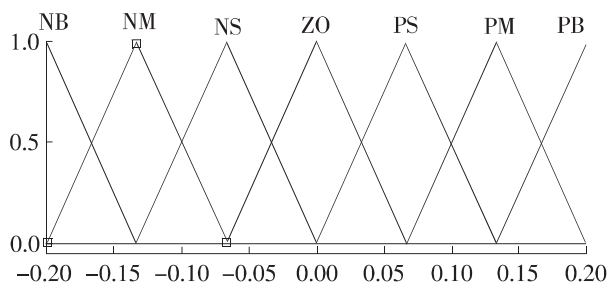


图 4 e 的隶属度函数

Fig. 4 Membership function of e

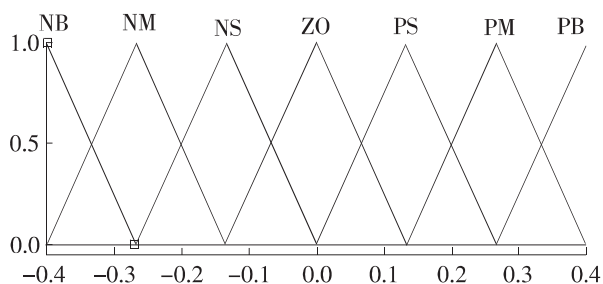


图 5 e_c 的隶属度函数

Fig. 5 Membership function of e_c

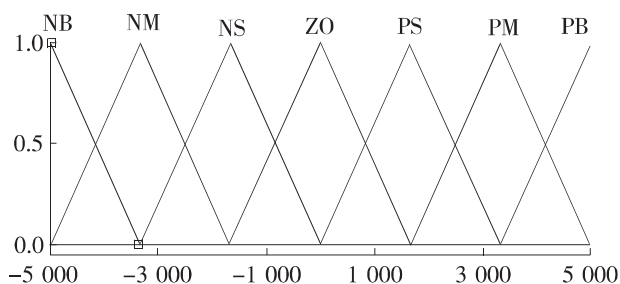


图 6 Δk_P 的隶属度函数

Fig. 6 Membership function of Δk_P

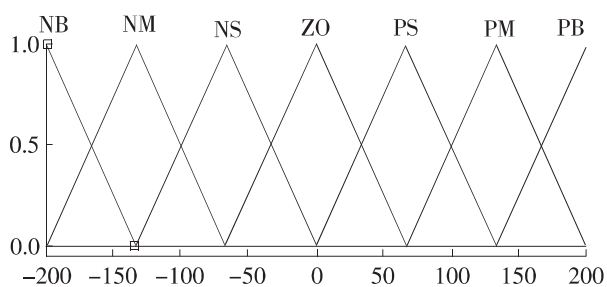


图 7 Δk_I 的隶属度函数

Fig. 7 Membership function of Δk_I

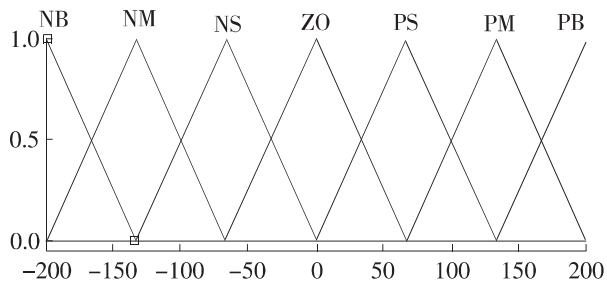


图 8 Δk_D 的隶属度函数

Fig. 8 Membership function of Δk_D

4) 明确控制规律。通过研究、归纳工人长期的操作经验以及分析传统 PID 控制器理论, 本研究认为对 PID 参变量进行调整并实现系统响应过程的追踪需要基于以下几个规则:

① 为了在系统动态运行期间避免超调以及在短时间内消除系统静态误差, 系统反应时间 K_P 应选取其最大值。在 $|e|$ 较大时, K_I 需为 0 或取其极小值; 在 $|e|$ 较小时, 为了使偏差不断变小, 防止系统响应过程出现较大的振荡和超调量, 同时为了消除系统静态误差, 避免破坏系统的稳定性, 需减小 K_P 的值, K_I 可取极小值; 在 $|e|$ 极小时, 为避免超调, 减小系统静态误差, 确保系统稳态, 需减小 K_P 的值, K_I 增大或保持不变。

② 当 $|e|$ 较大, 且 $e_c > 0$ 时, 减小 K_P 或令其取值为 0; 而当 $e_c < 0$ 时, 应适当增大 K_P 。

③ e_c 取值越大, K_P 越小, K_I 越大。

④ 系统的动态性能可以通过改变微分环节来实现, 当 e 的取值变大时, 令 K_D 的值为 0 或取极小值, 对系统进行 PI 调节。根据以上 4 条规律, 求出 $\Delta k_P, \Delta k_I, \Delta k_D$ 的模糊控制规则。

⑤ 获取模糊关系矩阵及控制规则表。根据已求得的输入、输出变量及模糊控制规则, 求解模糊控制输出量。把这些输入、输出按照一定的关系

和规则在同一个表中列出,即形成系统的模糊控制规则表^[13],见表 1~3。

表 1 ΔK_P 模糊控制规则表

Table 1 Table of fuzzy control rules for ΔK_P

ΔK_P	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZO
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
e ZO	PM	PS	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	ZO	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	NS	NS	NM	NM	NB	NB

表 2 ΔK_I 模糊控制规则表

Table 2 Table of fuzzy control rules for ΔK_I

ΔK_I	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	PM	ZO
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
e ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PB	PB	PB

表 3 ΔK_D 模糊控制规则表

Table 3 Table of fuzzy control rules for ΔK_D

ΔK_D	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	PS	ZO	ZO	NS	ZO	PB
NM	NS	NS	NS	NS	NS	ZO	NS
NS	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	PS
e ZO	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO	PS
PS	NB	NM	NS	NS	PS	ZO	PS
PM	NM	NS	NS	NS	PS	ZO	PS
PB	PS	ZO	ZO	ZO	PS	ZO	PM

⑥ 通过离散化得到位移偏差和位移偏差的变化率,将由模糊控制规则表得到的 $\Delta k_P, \Delta k_I, \Delta k_D$ 变换为系统论域控制量 $\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$ 。模糊规则控制图如图 9~11 所示。

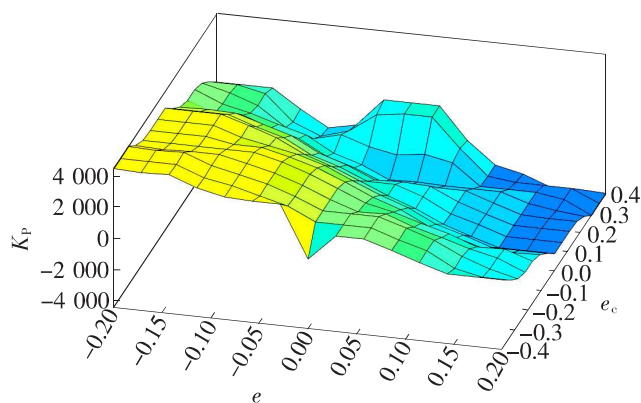


图 9 ΔK_P 的模糊控制图

Fig. 9 Fuzzy control chart of ΔK_P

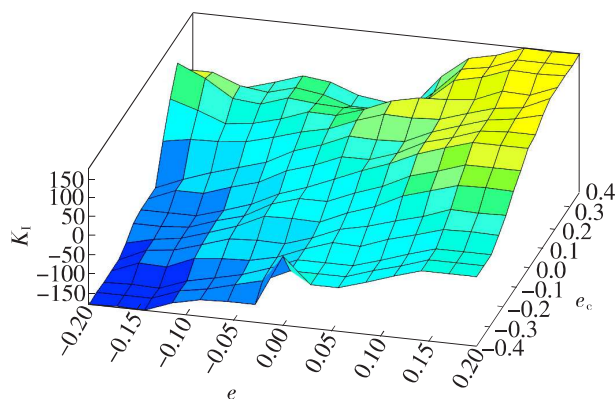


图 10 ΔK_I 的模糊控制图

Fig. 10 Fuzzy control chart of ΔK_I

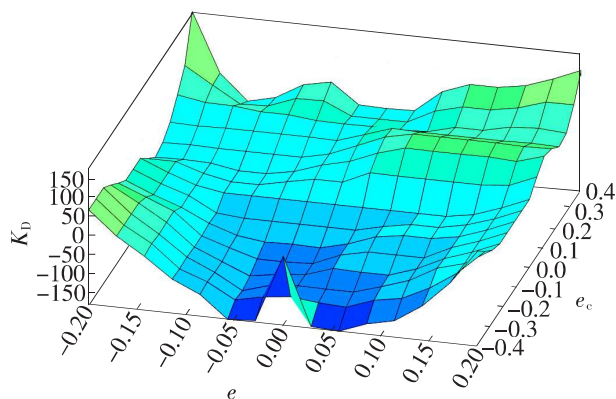


图 11 ΔK_D 的模糊控制图

Fig. 11 Fuzzy control chart of ΔK_D

⑦ 求出新的 PID 参数,即 $K_P = K_{P0} + \Delta K_P$, $K_I = K_{I0} + \Delta K_I$, $K_D = K_{D0} + \Delta K_D$ ^[14-15],然后由 PID 算法计算出液压油缸活塞的位移量。

2.2 调平液压系统滑模变结构控制器的设计

由于在控制上的间断性,滑模变结构控制实际上是一种比较特殊的非线性控制^[16],与其他控制相比,差别在于其系统结构是不确定的^[17]。在动态控制过程中,滑模变结构控制能在短时间内进行响应,同时对参数的变动及干扰不敏感,不需

要系统进行在线识别,只需采用物理的方式就可以完成^[18]。但该控制策略也有明显的缺点,即当状态轨迹逐渐趋近滑模面时,基于滑动平面向平衡点移动的难度较大,最终只能在滑模面两侧上下穿梭,因而出现了抖振^[19]。

滑模变结构控制器的设计包括滑模面的设计和控制率的设计。

2.2.1 滑模面的设计

在电液比例控制系统中,不需要考虑伺服阀的非线性影响,因而可将其简化为比例环节。AMESim 能根据实际设计的电液比例阀系统数学模型得出比例阀阀芯位移到调平油缸活塞位移的传递函数,即:

$$G(s) = \frac{K_h}{s(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h}s + 1)} \quad (3)$$

式中: K_h 为系统增益; ω_h 为阀控缸的固有频率; ξ_h 为阀控缸的阻尼。

经辨识后的模型为:

$$G(s) = \frac{0.0058 \times 949.7572^2}{s(s^2 + 2 \times 0.0132 \times 949.7572s + 949.7572^2)} \quad (4)$$

状态空间方程为:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \\ y &= \begin{bmatrix} 0 & -\omega_h^2 & -2\xi_h\omega_h \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} K_h\omega_h^2 \end{bmatrix} u \end{aligned} \quad (5)$$

式中: u 为输入控制函数。

被控对象为三阶系统, $\mathbf{X} = [\mathbf{x} \quad \dot{\mathbf{x}} \quad \ddot{\mathbf{x}}]$ 为系统状态变量。设 r 为给定的输入信号, y 为系统输出信号, 则系统的误差为 $e = r - y$, 定义系统的误差向量为:

$$\mathbf{E} = [e_1 \quad e_2 \quad e_3]^T = [r - y \quad \dot{r} - \dot{y} \quad \ddot{r} - \ddot{y}]^T \quad (6)$$

式中: e_1, e_2, e_3 分别为误差及误差的一阶和二阶导数。

根据系统模型的状态空间方程组(7)可得到误差状态方程(8):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = -\omega_h^2 x_2 - 2\xi_h\omega_h x_3 + K_h\omega_h^2 u \end{cases} \quad (7)$$

$$y = x_1$$

$$\dot{\mathbf{E}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_h^2 & -2\xi_h\omega_h \end{bmatrix} \mathbf{E} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_h\omega_h^2 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[\ddot{r} + 2\xi_h\omega_h\ddot{r} + \omega_h^2\dot{r}]$$

所设计的滑模切换函数为:

$$s = c_1 e_1 + c_2 e_2 + e_3 \quad (9)$$

滑模运动的微分方程组为:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{E}} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_h^2 & -2\xi_h\omega_h \end{bmatrix} \mathbf{E} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_h\omega_h^2 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &[\ddot{r} + 2\xi_h\omega_h\ddot{r} + \omega_h^2\dot{r}] \\ c_1 e_1 + c_2 e_2 + e_3 &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

用 $s = c_1 e_1 + c_2 e_2 + e_3 = 0$ 对滑模运动的微分方程进行简化后得到:

$$s = c_1 e_1 + c_2 e_2 + e_3 = c_1 e_1 + c_2 \dot{e}_1 + \ddot{e}_1 = 0 \quad (11)$$

式(11)决定了滑动模态的动态品质, 其中, c_1, c_2 可采用极点配置法计算得到。本研究选定期望极点为 $-31.9 \pm 156.32i$, 通过计算得到参数 $c_1 = 28.752, c_2 = 64.3$ 。

2.2.2 控制器的设计

滑模变结构控制器的设计如下:

$$u = u_{eq} + u_{sw} \quad (12)$$

式中: u_{eq} 表示等效控制, 能实现对系统状态的跟踪, 即将系统的状态一直保持在滑模面上; u_{sw} 表示切换控制, 可使系统状态趋近于滑模面, 削弱系统的抖振。为将调平所需时间控制在较小范围内, 在此选择指数趋近方式进行设计。

在等效控制部分, 对 $s = c_1 e_1 + c_2 e_2 + e_3$ 求导可得:

$$\begin{aligned}
\dot{s} &= c_1 \dot{e}_1 + c_2 \dot{e}_2 + \dot{e}_3 = \\
c_1 \dot{e}_1 + c_2 \dot{e}_2 - \omega_h^2 e_2 - 2\xi_h \omega_h \dot{e}_3 - \\
K_h \omega_h^2 u + \ddot{r} + 2\xi_h \omega_h \ddot{r} + \omega_h^2 \dot{r} &= \\
c_1 e_2 + c_2 e_3 - \omega_h^2 e_2 - 2\xi_h \omega_h \dot{e}_3 - \\
K_h \omega_h^2 u + \ddot{r} + 2\xi_h \omega_h \ddot{r} + \omega_h^2 \dot{r}
\end{aligned} \quad (13)$$

由 $\dot{s}=0$ 可得等效控制为:

$$\begin{aligned}
u_{eq} &= \frac{1}{K_h \omega_h^2} [(c_1 - \omega_h^2) e_2 + (c_2 - 2\xi_h \omega_h) e_3 + \\
&\quad \ddot{r} + 2\xi_h \omega_h \ddot{r} + \omega_h^2 \dot{r}]
\end{aligned} \quad (14)$$

在切换控制部分,选择指数趋近律,即:

$$\dot{s} = -\epsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (15)$$

式中: ϵ 为趋近速度。

其中:

$$\operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} +1, s > 0 \\ -1, s < 0 \end{cases} \quad (16)$$

如果 ϵ 很小,则趋近速度较慢,调节过程太长;反之,如果 ϵ 过大,则系统在到达切换面时,速度较大,会引起剧烈的抖动。而 k 可以减少调节所用时间,使系统快速到达滑模面,还可以减轻抖动,改善系统品质。本研究中指数趋近律的参数 k 取 3 000, ϵ 取 200。因此,切换控制为:

$$u_{sw} = -\epsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (17)$$

综上所述,可将滑模变结构的控制器设计为:

$$\begin{aligned}
u &= u_{eq} + u_{sw} = \frac{1}{K_h \omega_h^2} [(c_1 - \omega_h^2) e_2 + (c_2 - \\
&\quad 2\xi_h \omega_h) e_3 + \ddot{r} + 2\xi_h \omega_h \ddot{r} + \omega_h^2 \dot{r} + \epsilon \operatorname{sgn}(s) + ks]
\end{aligned} \quad (18)$$

3 基于 MATLAB/AMESim 的算法设计与调平液压系统建模

3.1 联合仿真模型设计

按照精密整平作业车调平液压系统的原理图,进行液压仿真模型的构建。在联合仿真设置下,建立基于传统 PID、Fuzzy-PID、滑模变结构控制这 3 种控制算法的模型,并根据实际工况对每种模型加入随机扰动,结果如图 12~16 所示。

3.2 调平液压系统仿真参数设置

精密整平作业车调平液压系统的仿真结果受

参数的影响较大。当参数设定存在问题时,仿真结果也会产生较大偏差,严重时会使仿真失败而无法获得预期结果,这将对调平液压系统的总体规划产生直接的影响。设定的调平液压系统 AMESim 的参数见表 4。

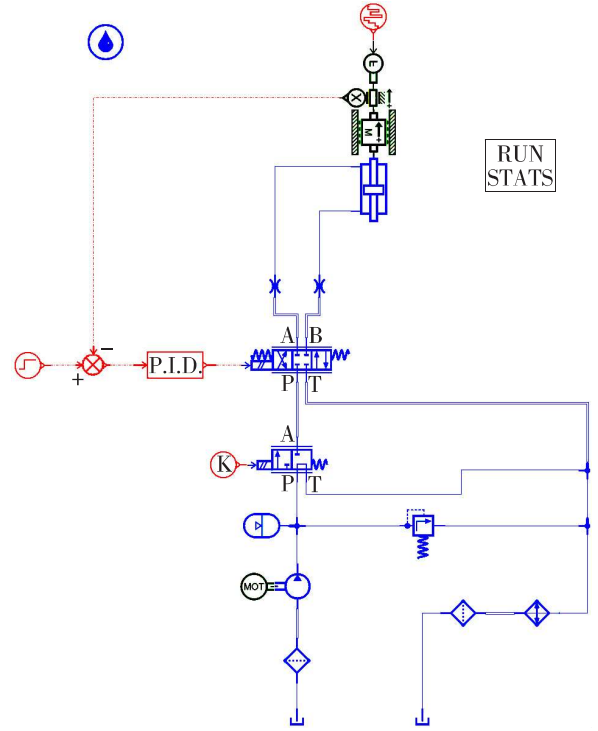


图 12 传统 PID 调平液压系统原理图

Fig. 12 Principle diagram of conventional PID leveling hydraulic system

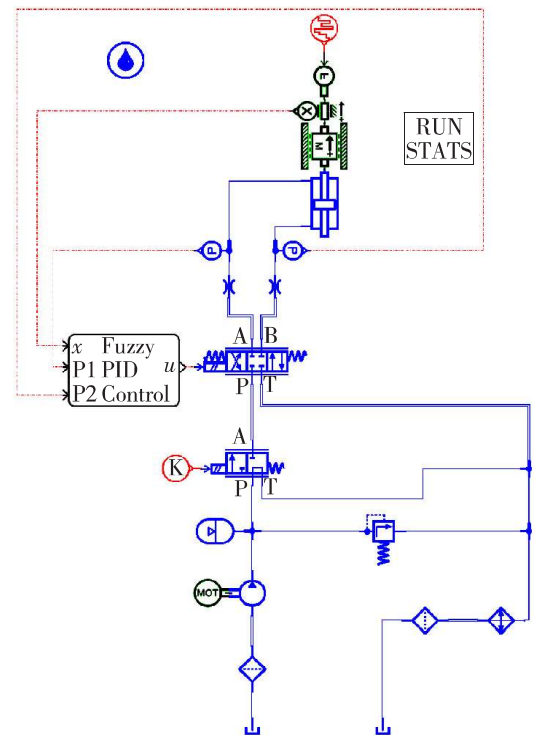


图 13 Fuzzy-PID 调平液压系统原理图

Fig. 13 Principle diagram of Fuzzy-PID leveling hydraulic system

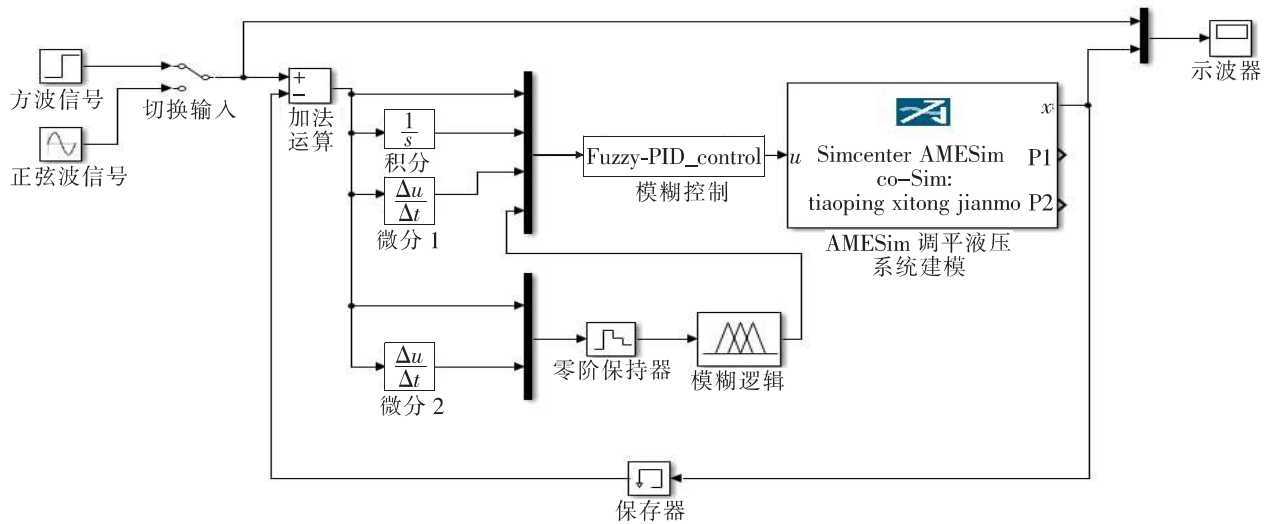


图 14 Simulink 调平液压系统 Fuzzy-PID 控制系统图

Fig. 14 Fuzzy-PID control system diagram with Simulink leveling hydraulic system

表 4 调平液压系统 AMESim 的参数

Table 4 Parameters of leveling hydraulic system AMESim

参数	参数值
液压油黏度(40 ℃)/($\times 10^4$ Pa \cdot s)	5.1
液压油密度/(kg \cdot m $^{-3}$)	850
液压泵转速/(r \cdot min $^{-1}$)	2 200
液压泵排量/(mL \cdot r $^{-1}$)	18.18
溢流阀压力/MPa	20
三位四通比例换向阀通流量/(L \cdot min $^{-1}$)	50
三位四通比例换向阀压降特性/($\times 10^6$ Pa)	1
调平油缸活塞直径/mm	63
调平油缸活塞杆直径/mm	45
调平油缸活塞行程/mm	400
蓄能器充气压力/($\times 10^6$ Pa)	3.2
蓄能器容积/L	2.871

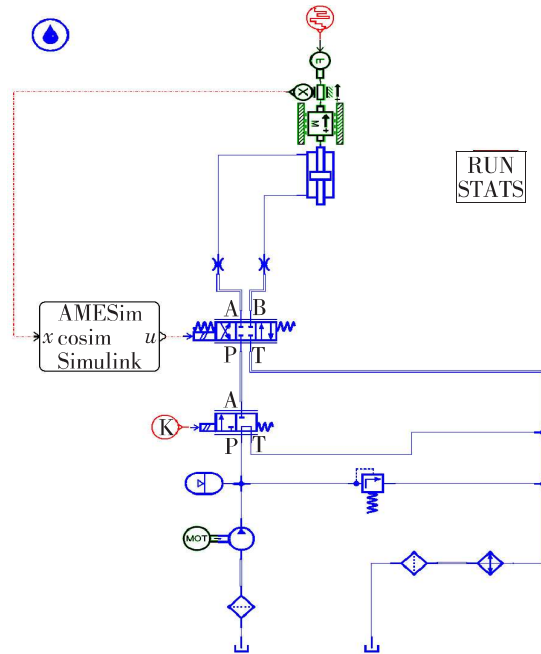


图 15 滑模变结构控制调平液压系统原理图

Fig. 15 Principle diagram of leveling hydraulic system of sliding mode control

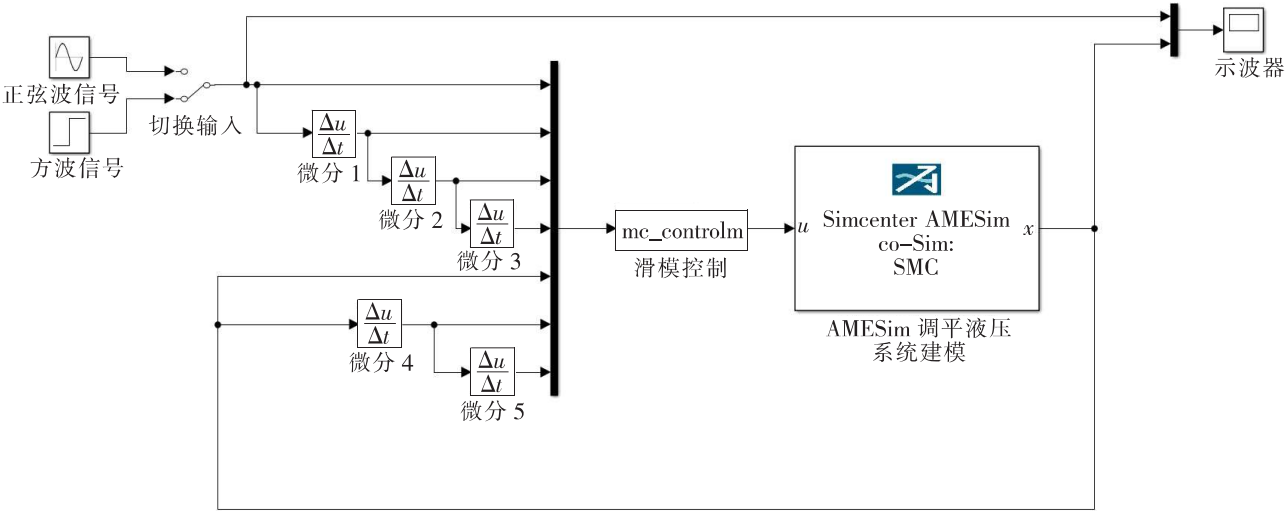


图 16 Simulink 调平液压系统滑模变结构控制系统图

Fig. 16 Sliding mode control system diagram with Simulink leveling hydraulic system

4 调平液压系统仿真结果分析

在 AMESim 中完成液压系统模型、参数的设置,在 MATLAB/Simulink 中搭建控制算法,然后对调平液压系统进行联合仿真。在 AMESim 的建模过程中对每个控制模型都添加一个随机外部干扰,来模拟调平液压系统调平时振捣板碰到的各种障碍或重物所产生的压力,如此建模可以使仿真结果更加精确,更加贴合实际。

4.1 液压缸位移跟踪控制分析

图 17~20 为 3 种控制算法下液压缸活塞位移和收敛时间的跟踪情况。

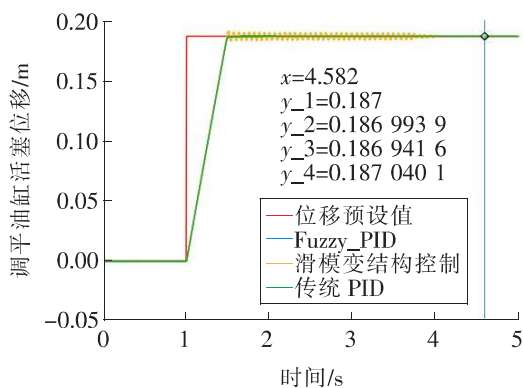


图 17 调平油缸活塞的跟踪位移

Fig. 17 Tracking displacement of leveling cylinder piston

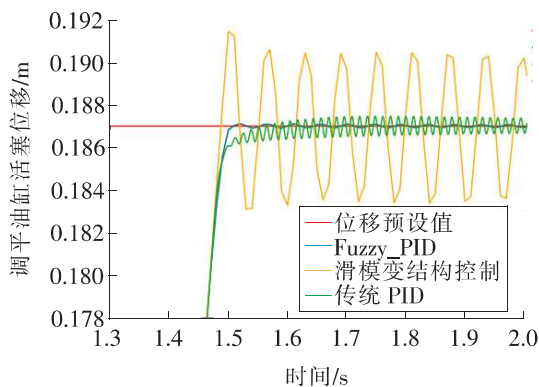


图 18 调平油缸活塞跟踪位移细节图

Fig. 18 Detailed drawing of tracking displacement of leveling cylinder piston

从图 17~18 可以看出,在 3 种控制算法下液压缸活塞位移均能跟踪到期望位移,但是在传统 PID 和滑模变结构控制算法下,液压缸活塞位移在前期都有明显的抖动;从图 19~20 可以看出,在 Fuzzy-PID 算法下,调平油缸活塞位移在 0.532 s 时达到稳态,但由于外界的持续干扰,仍需不断调节使其保持稳态。在滑模变结构和传统 PID 控

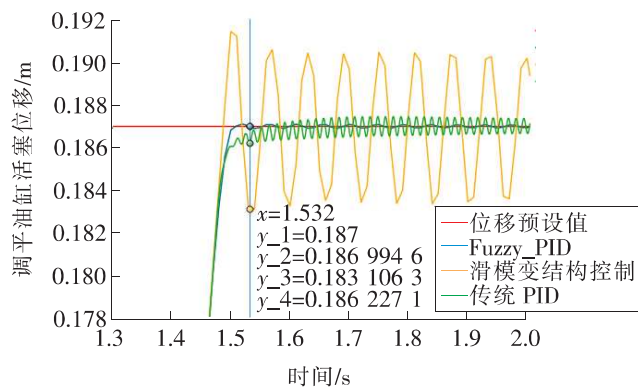


图 19 Fuzzy-PID 控制下调平油缸活塞位移的跟踪时间图

Fig. 19 Tracking time chart of leveling cylinder piston displacement under Fuzzy-PID control

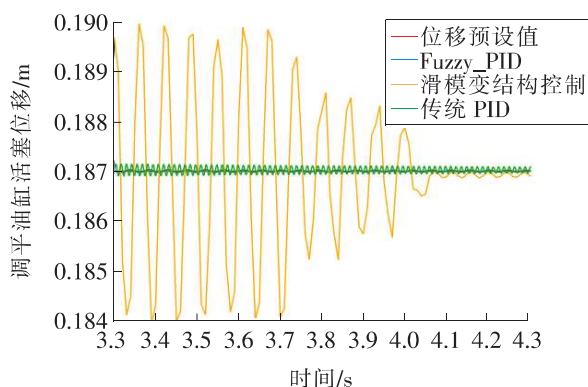


图 20 滑模变结构控制下调平油缸活塞位移的跟踪时间图

Fig. 20 Tracking time diagram of leveling cylinder piston under sliding mode variable structure control

制算法下,调平油缸活塞位移达到稳态的时间较长,在滑模变结构控制算法下调平油缸活塞位移在 3.111 s 左右达到稳态;而在传统 PID 控制算法下,虽然调平油缸活塞位移较早就开始收敛,但在外界的干扰下,一直处于微小的振荡状态。在精度上,经过试验数据和仿真数据整定后的 Fuzzy-PID 跟踪曲线一直在预设值上下轻微波动,振幅较小,鲁棒性较好;滑模变结构控制具有较大的超调量,但随着时间的推移,超调量逐渐变小并收敛至稳定状态,其精度略低于 Fuzzy-PID 控制;而对于传统 PID 控制,在外界不规律的扰动下,鲁棒性较低。

4.2 3 种控制算法下的压力分析

图 21~22 所示为 3 种控制算法下液压缸压力的变化情况。

从图 21 可以看出,在控制信号输入之前,在没有规律的外界干扰下,调平油缸一直处于受压状态。如果没有调节信号的控制,调平油缸中的活塞会一直不规则地运动下去,且振幅较大,系统

会因此受到冲击。而在图 17 中,调平油缸在控制信号下并没有做不规则运动,且系统稳定。在控制信号输入之后,调平油缸所受到的压力开始上升。3 种算法均在 0.532 s 左右达到控制目标,此时,调平油缸开始出现压力振荡。在滑模变结构控制下,调平油缸的压力振荡持续到 4.11 s 左右趋于稳定;在传统 PID 控制下,调平油缸在活塞行程结束后压力振荡逐渐减小直至稳定,但耗时比滑模变结构控制的长;而在 Fuzzy-PID 控制下,调平油缸压力在达到控制点时虽然有振荡,但幅度较小,且很快就趋于稳定。与另外两种控制算法相比,Fuzzy-PID 控制下的调平液压系统在稳定性方面有明显的优势,可以显著优化调平液压系统的使用寿命。

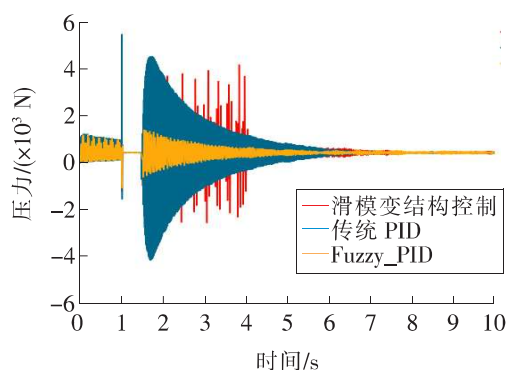


图 21 液压缸的压力变化

Fig. 21 Pressure change of hydraulic cylinder

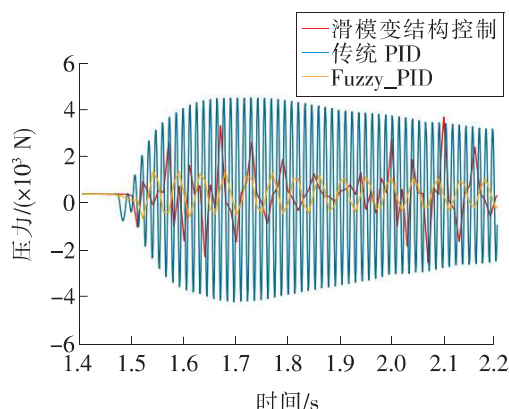


图 22 液压缸压力变化的局部图

Fig. 22 Partial diagram of pressure change of hydraulic cylinder

4.3 3 种控制算法下的流量分析

图 23~24 所示为 3 种控制算法下调平油缸流量的变化情况。

从图 23 中可看出,3 种控制算法在调平油缸的流量控制方面有优劣之分。在 1 s 之前,由于外界的振荡,调平油缸内只有少许油液流通;在 1 s

时,电液比例阀收到调平信号。在 Fuzzy-PID 算法的控制下,调平油缸的流量迅速增大,反应灵敏,并且在 1.53 s 左右完成了全部油液的流通;在传统 PID 算法的控制下,调平油缸流量的变化趋势和 Fuzzy-PID 算法的接近,但流量要比 Fuzzy-PID 算法下的大很多;而在滑模变结构控制下,初始的抖振使调平油缸的流量较大,在 4.11 s 时,抖振消失,流量变得非常小。过大的通流量会使整个系统受到冲击,长期的高压状态对系统也有很大的负面影响。Fuzzy-PID 算法可有效防止通流量过大,保证系统稳定,在有外界干扰的情况下,具有更优秀的鲁棒性。

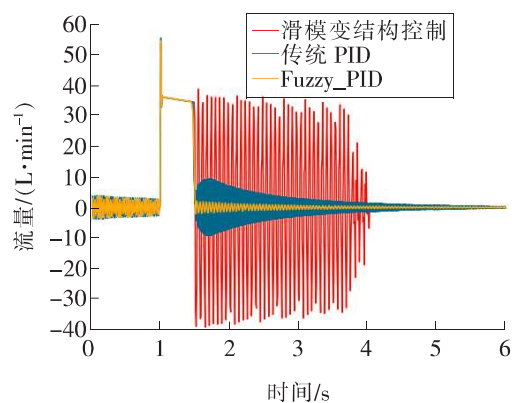


图 23 调平油缸的流量变化

Fig. 23 Flow change of leveling cylinder

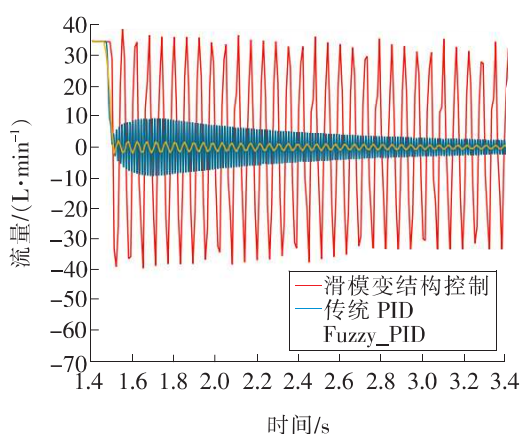


图 24 调平油缸流量变化的局部图

Fig. 24 Partial diagram of flow change of leveling cylinder

5 结论

本研究基于已定的混凝土精密整平作业车调平液压系统的规划方案,对液压系统的相关元件进行了参数设置;通过开展 MATLAB/AMESim 仿真,对比了 3 种控制算法在调平液压系统应用中的优劣。主要结论如下:

1) 设定了调平液压系统的规划方案,制定了调平系统的液压原理图。

2) 对 Fuzzy-PID 和滑模变结构控制算法在调平液压系统中的应用进行设计。对于 Fuzzy-PID 控制器,确定为两输入三输出,设计了对应论域,构建了模糊规则表;对于滑模变结构控制,在 AMESim 中对调平液压系统进行了参数辨识,并使用辨识后的数学模型设计了滑模变结构控制器,计算了滑模变结构控制器参数。

3) 阐述了 MATLAB/AMESim 联合仿真的优势,并进行了算法设计;在 AMESim 中进行了调平液压系统模型的建模,并设置了各元件的参数。在联合仿真过程中,对精密整平作业车调平油缸的位移控制、流量控制和压力控制进行了实时跟踪。仿真结果显示,在参数整定优异的情况下,Fuzzy-PID 算法比滑模变结构算法的控制时间缩短了 2.579 s。对于压力控制,Fuzzy-PID 算法下调平系统所受到的最大系统冲击力分别是滑模变结构算法和传统 PID 算法下的 40%和 30%;对于流量控制,前者调平系统的最大流量分别是后两者的 5.3%和 22%。因此,Fuzzy-PID 算法大大提高了系统的稳定性和对外界的抗干扰能力,优势突出。

本研究最终选定 Fuzzy-PID 作为精密整平作业车调平液压系统的控制算法。

〔参考文献〕

- [1] 张新,陈卓威,谢旭敏. 基于 AMESim 的精密整平作业车液压系统仿真[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2018,15(4):87-94.
ZHANG Xin, CHEN Zhuo-wei, XIE Xu-min. Hydraulic system of precision leveling vehicle based on AMESim [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2018, 15(4): 87-94.
- [2] 李建光. 城市轨道交通施工技术发展与展望[J]. 城市轨道交通研究,2018,21(5):83-86.
LI Jian-guang. Development of urban rail transit construction technology and prospect [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(5): 83-86.
- [3] SABAN C, AKKAYA A V. Simulation and hybrid fuzzy-PID control for positioning of a hydraulic system[J]. Nonlinear Dynamics, 2010, 61(3): 465-476.
- [4] 龙泽明,张红岩,张保军,等. 基于 STM32 的 PWM

电液比例阀控系统的设计[J]. 中国科技信息, 2014 (22): 178-179.

LONG Ze-ming, ZHANG Hong-yan, ZHANG Bao-jun, et al. Design of PWM electro-hydraulic proportional valve control system based on STM32[J]. China Science and Technology Information, 2014 (22): 178-179.

- [5] KANAGALAKSHMI S, MANAMALLI D, RAFIQ M M. Implementation of multi model based PID and intelligent controller for simulated and real time temperature control of injection molding machine [J]. Chemical Engineering Communications, 2015, 203(4): 452-462.
- [6] LOTFI M, MENHAJ M B, HOSSEINI S A, et al. A design of switching supervisory control based on fuzzy-PID controllers for VVER-1000 pressurizer system with RELAP5 and MATLAB coupling [J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 147: 107625.
- [7] YANG K U, HUR J G, KIM G J, et al. Non-linear modeling and dynamic analysis of hydraulic control valve; effect of a decision factor between experiment and numerical simulation [J]. Nonlinear Dynamics, 2012, 69(4): 2 135-2 146.
- [8] 赵治国, 杨云云, 陈海军, 等. 干式 DCT 预换挡过程分析及拨叉轴位置伺服控制 [J]. 中国公路学报, 2015, 28(10): 120-128.
ZHAO Zhi-guo, YANG Yun-yun, CHEN Hai-jun, et al. Pre-shift process analysis and position servo control of shifting fork shaft for dry dual clutch transmission [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(10): 120-128.
- [9] 殷超, 张建润, 石统蒙, 等. 摊铺机振捣机构多重相位对动力学特性影响 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(8): 167-171.
YIN Chao, ZHANG Jian-run, SHI Tong-meng, et al. Effects of multiple phases on dynamic characteristics of paver tamper mechanism [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(8): 167-171.
- [10] 贾洁, 刘洪海, 辛强, 等. 摊铺机熨平板冲击与振动耦合压实特性研究 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(16): 91-97, 146.
JIA Jie, LIU Hong-hai, XIN Qiang, et al. Investigation of paver screed on coupling compaction characteristics considering shock and vibration [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(16): 91-97, 146.

(下转至第 117 页)

- [25] WAN G, WU B L, ZHAO Y H, et al. Strain-rate sensitivity of textured Mg-3.0Al-1.0Zn alloy (AZ31) under impact deformation[J]. Scripta Materialia, 2011, 65: 461-464.
- [26] LI G H, ZHOU L, ZHANG H F, et al. Evolution of grain structure, texture and mechanical properties of a Mg-Zn-Zr alloy in bobbin friction stir welding[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 799: 140267.
- [27] TAHREEN N, CHEN D L, NOURI M, et al. Influence of aluminum content on twinning and texture development of cast Mg-Al-Zn alloy during compression[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 623: 15-23.
- [28] LI X, F JIAO, AL-SAMMAN T, et al. Influence of second-phase precipitates on the texture evolution of Mg-Al-Zn alloys during hot deformation [J]. Scripta Materialia, 2012, 66(3-4): 159-162.
- [29] DONG H W, PAN F S, JIANG B, et al. Anisotropy of the extruded and heat-treated Li containing AZ31 magnesium alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 590: 233-240.
- [30] WANG H Y, RONG J, YU Z Y, et al. Tensile properties, texture evolutions and deformation anisotropy of as-extruded Mg-6Zn-1Zr magnesium alloy at room and elevated temperatures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 697: 149-157.
- [31] ZHANG X H, CHENG Y S. Tensile anisotropy of AZ91 magnesium alloy by equal channel angular processing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 622: 1 105-1 109.
- [32] LI X, YANG P, MENG L. Analysis of the static recrystallization at tension twins in AZ31 magnesium alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(2): 147-154.
- [33] WANG Y N, HUANG J C. Texture analysis in hexagonal materials[J]. Materials Chemistry & Physics, 2003, 81(1): 11-26.
- [34] KIM J, OKAYASU K, FUKUTOMI H. Deformation behavior and texture formation in AZ80 magnesium alloy during uniaxial compression deformation at high temperatures[J]. Materials Transactions, 2013, 54(2): 192-198.

(上接第 99 页)

- [11] AHMED S A, TANEVA A M, PETROV M G, et al. Self-tuning fuzzy pid: real time control applications[J]. Measurement Techniques, 2013, 5 (2): 124-125.
- [12] TRUONG D Q, AHN K K, SOO K J, et al. Application of fuzzy-PID controller in hydraulic load simulator[C]//Proceedings of ICMA 2007. New York: IEEE, 2007: 2 537-2 544.
- [13] FAN Z, MA Z, SHANG G. Research of fuzzy PID control for giant magnetostrictive actuator [C]//Proceedings of the 31st Chinese Control Conference. New York: IEEE, 2012.
- [14] CARVAJAL J, CHENG R, OGMEN H, et al. Fuzzy PID controller: design, performance evaluation, and stability analysis [J]. Information Sciences, 2000, 123(3-4): 249-270.
- [15] TRUONG D Q, AHN K K. Force control for hydraulic load simulator using self-tuning grey predictor-fuzzy PID[J]. Mechatronics, 2009, 19(2): 233-246.
- [16] JIN H, ZHAO X, WANG T. Modified complementary sliding mode control with disturbance compensation for permanent magnet linear synchronous motor servo system[J]. IET Electric Power Applications, 2020, 14(2): 765-772.
- [17] LI H, WU W, HUANG M, et al. Design of PWM-SMC controller using linearized model for grid-connected inverter with LCL filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(12): 12 773-12 786.
- [18] 田艳兵, 徐亚明, 刘庆龙, 等. 气动二维超精密伺服系统输出反馈滑模变结构控制[J]. 机械工程学报, 2019, 55(7): 163-171.
- TIAN Yan-bing, XU Ya-ming, LIU Qing-long, et al. Sliding mode control for pneumatic two dimensional ultra-precision servo system based on output feedback[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55 (7): 163-171.
- [19] CAO Y, WANG Z C, LIU F, et al. Bio-inspired speed curve optimization and sliding mode tracking control for subway trains[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(7): 6 331-6 342.