

基于遗传算法的汽车 ESP 液压系统参数辨识*

张家旭^{1,2} 李静¹

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022; 2. 中国第一汽车集团技术中心, 长春 130011)

摘要: ESP 液压系统是保证汽车行驶安全性的重要执行机构, 根据 ESP 液压系统的结构原理, 在 Matlab/Simulink 环境下建立其实时仿真模型。采用实车测试环境下记录的试验数据作为参考数据, 基于遗传算法对 ESP 液压系统模型的未知特征参数进行辨识。对比运行于实时仿真机的 ESP 液压系统模型输出的制动轮缸压力与实车测试环境下的记录值, 结果表明用辨识数据参数化的 ESP 液压系统模型具有较高的符合度, 可满足构建 ESP 系统硬件在环仿真测试环境的需求。

关键词: ESP 液压系统 遗传算法 参数辨识

中图分类号: U463.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0308-06

Parameter Identification of Automotive ESP Hydraulic System Based on Genetic Algorithm

Zhang Jiayu^{1,2} Li Jing¹

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China

2. Research and Development Center, China FAW Group Corporation, Changchun 130011, China)

Abstract: ESP hydraulic system is an important actuator for the active safety control system of vehicle. In the Matlab/Simulink environment, the real-time simulation model of ESP hydraulic system, which contains unknown characteristic parameters, is established on the strength of its structural principle. In order to identify the unknown characteristic parameters, several test cases that cover passive and active pressurization modes of the model are executed in the real vehicle experiment environment, and the collected vehicle measurements are divided into two groups. The unknown characteristic parameters of the model are identified with genetic algorithm by using one group as reference data. The model is compiled and downloaded to the real-time simulation system, which is named dSPACE AutoBox. Using the valve currents and pump motor signals of another group of measurements as the inputs of the model, the brake wheel cylinder pressures of the same group of measurements are compared with the outputs of the model. The results show that the real-time simulation model of ESP hydraulic system with the identification results of characteristic parameters has high accuracy, and can meet the requirements of establishing hardware in the loop simulation test environment for ESP system.

Key words: ESP hydraulic system Genetic algorithm Parameter identification

引言

汽车电子稳定性程序 (Electronic stability

program, ESP) 是在防抱死制动系统 (ABS) 和牵引力控制系统 (TCS) 基础上加入横摆力矩控制系统 (AYC) 构成的, 可自动根据传感器测量的车辆状态

收稿日期: 2014-11-18 修回日期: 2015-01-05

* 国家自然科学基金资助项目 (51275206)

作者简介: 张家旭, 博士生, 中国第一汽车集团技术中心工程师, 主要从事汽车地面力分析与控制研究, E-mail: zhjx_686@163.com

通讯作者: 李静, 教授, 博士生导师, 主要从事汽车地面力分析与控制研究, E-mail: liye1129@163.com

信息控制 ESP 液压系统执行机构,进而最大限度地提高汽车在极限工况下的安全性^[1]。在 ESP 系统开发过程中需要对其进行全面的性能测试,考虑基于实车测试环境完成 ESP 系统性能测试的方法成本高、周期长且难于实现极限危险工况测试等问题^[2],希望构建一种模拟实车测试环境的硬件在环仿真测试系统来对 ESP 系统进行充分的性能测试。而建立高精度的 ESP 液压系统实时仿真模型是构建该仿真测试系统的关键环节。

近年来,国内外学者对 ESP 液压系统进行了大量的研究^[3-12]。对 ESP 液压系统的研究多是通过建立离线 ESP 液压系统模型来分析液压元件结构及特征参数对 ESP 系统性能的影响,或者建立可实时运行于 ESP 系统的制动压力预估模型来计算 ESP 系统增压和减压的速率,而较少有文献对建立高精度、可实时运行于硬件在环仿真测试系统的 ESP 液压系统模型进行深入研究。本文根据 ESP 液压系统的结构原理,在 Matlab/Simulink 环境下建立其实时仿真模型。同时,将实车测试环境下记录的试验数据作为参考数据,采用遗传算法辨识出 ESP 液压系统模型的未知特征参数。最后,将 ESP 液压系统模型编译、下载到 dSPACE AutoBox 实时仿真机,对比运行于实时仿真机的 ESP 液压系统模型计算输出的制动轮缸压力与实车测试环境下的记录值。

1 ESP 液压系统数学模型

ESP 液压系统是一个复杂的非线性系统。为了有效仿真系统的动态特性,从系统的关键零部件的液压特性出发,对电磁阀、蓄能器、柱塞泵和制动轮缸的液压特性分别建模。

电磁阀:ESP 液压系统的增压阀、限压阀、减压阀和吸入阀均为开关阀。根据小孔节流公式,得到电磁阀流量为^[13]

$$q = \text{sign}(\Delta p) \sqrt{\frac{1}{K} |\Delta p|} \quad (1)$$

其中 $K = \frac{\rho}{2(C_d A)^2}$

式中 q ——电磁阀输出流量

Δp ——电磁阀两端压力差

C_d ——流量系数 ρ ——液体密度

A ——电磁阀阀芯面积

蓄能器:ESP 液压系统包括位于液压泵附近的高压阻尼器和位于减压阀附近的低压蓄能器。其中,高压阻尼器可吸收液压泵产生的脉动、降低噪声,为 ESP 液压系统主动增压提供恒压油源;低压蓄能器可吸收 ESP 液压系统减压过程中的压力冲

击和存储减压液量。其数学模型为

$$\dot{p} = \frac{E q_{\text{out}}}{V + \frac{A_p^2 E}{k}} = \frac{E q_{\text{out}}}{\int q_{\text{out}} dt + C_0} \quad (2)$$

其中 $C_0 = \frac{A_p^2 E}{k}$

式中 \dot{p} ——蓄能器端口压力变化率

E ——液体弹性模量

q_{out} ——蓄能器端口流量

V ——蓄能器中的制动液体积

A_p ——活塞截面积 k ——弹簧刚度

液压泵:ESP 液压系统的液压泵采用单柱塞泵,由带偏心轮的电动机驱动,在压油阀和吸油阀之间形成一个密闭的柱塞腔。偏心轮转动一周,柱塞完成一个往复行程。当柱塞向上运动时,通过压油阀完成压油行程;当柱塞向下运动时,通过吸油阀完成吸油行程。本文忽略柱塞一个往复行程内不同偏心轮转角位置的液压泵流量差别,对一个往复行程进行平均值处理,建立的液压泵流量均值模型为

$$q_b = A_z e n = \frac{\pi}{4} d^2 e n \quad (3)$$

式中 A_z ——柱塞工作面积

e ——电动机偏心轮偏心量

n ——电动机转速 d ——柱塞直径

选择直流电动机作为驱动液压泵的电动机。忽略电动机电枢的回路电阻,建立直流电动机模型^[14]

$$n = \frac{U}{K_e \Phi} \quad (4)$$

式中 U ——电动机电枢电压

K_e ——由电动机结构决定的电动势常数

Φ ——励磁磁通

将式(4)代入式(3)得到液压泵流量与电动机电枢电压之间的关系

$$q_b = \frac{\pi}{4} d^2 e \frac{U}{K_e \Phi} = C_1 U \quad (5)$$

其中

$$C_1 = \frac{\pi d^2 e}{4 K_e \Phi}$$

制动轮缸:装配 ESP 系统的汽车采用盘式制动器。考虑制动块与制动盘之间的间隙,忽略活塞与制动块的惯性及活塞运动的产生阻尼效应,建立制动过程的等效模型

$$\begin{cases} p_z S = \max(k_{q1} G_q + k_{q2} x_q, 0) \\ x_q S = \int_0^t q_{\text{in}} dt \end{cases} \quad (6)$$

式中 p_z ——制动压力 q_{in} ——制动液流量

S ——制动轮缸的断面积

x_q ——活塞与制动块的位移

G_q, k_{q2} ——制动块与制动盘的间隙及刚度

k_{q1} ——活塞与橡胶密封圈间的刚度

对式(6)进一步整理得到制动压力与制动液流量之间的关系

$$p_z = \max \left(C_3 \int_0^t q_{in} dt + C_2, 0 \right) \quad (7)$$

其中
$$C_3 = \frac{k_{q2}}{S^2} \quad C_2 = \frac{k_{q1} G_q}{S}$$

2 基于遗传算法的参数辨识方法

基于遗传算法的 ESP 液压系统模型参数辨识就是利用该算法的空间快速并行搜索能力,从 ESP 液压系统模型待辨识特征参数的可行解集中找到最优解,使 ESP 液压系统模型等价于真实系统^[15]。该算法计算过程包括确定群体和解的集合,确定编码方式、选择运算、交叉运算、变异运算及个体评价方式^[16]。

确定待辨识特征参数及范围:ESP 液压系统采用 X 型制动管路布置,即制动主缸的一个出油口与右前轮、左后轮制动轮缸通过油路相连,制动主缸的另一个出油口与左前轮、右后轮制动轮缸通过油路相连。因为 X 型制动管路布置的 2 个油路结构对称,本文仅对一个油路进行研究,ESP 液压系统模型待辨识的特征参数及范围如表 1 所示。

表 1 ESP 液压系统待辨识特征参数及范围

Tab. 1 Characteristic parameters and their ranges that need to be identified for ESP hydraulic system

参数	数值
左前轮增压阀系数 $K_{FLEV}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-7})$	$10^{16} \sim 10^{18}$
左前轮减压阀系数 $K_{FLAV}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-7})$	$10^{14} \sim 10^{15}$
右后轮增压阀系数 $K_{RREV}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-7})$	$10^{16} \sim 10^{18}$
右后轮减压阀系数 $K_{RRAV}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-7})$	$10^{14} \sim 10^{15}$
限压阀系数 $K_{USV}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-7})$	$10^{15} \sim 10^{16}$
吸入阀系数 $K_{HSV}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-7})$	$10^{14} \sim 10^{15}$
高压阻尼器系数 C_{0H}/m^3	$10^7 \sim 10^8$
低压蓄能器系数 C_{0L}/m^3	$10^7 \sim 10^8$
液压泵系数 $C_1/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1})$	$10^{-7} \sim 10^{-6}$
左前制动轮缸系数 $C_{2FL}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	$-10^7 \sim -10^6$
左前制动轮缸系数 $C_{3FL}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-5})$	$10^{12} \sim 10^{13}$
右后制动轮缸系数 $C_{2RR}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	$-10^7 \sim -10^6$
右后制动轮缸系数 $C_{3RR}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-5})$	$10^{13} \sim 10^{14}$

确定编码方法:传统的待辨识特征参数编码方式为二进制编码,但相邻整数的二进制编码可能具有较大的 Hamming 距离,影响遗传算子的搜索效率和计算精度^[17]。同时,二进制编码的随机特性使得其局部搜索能力较差。因此,本文选用格雷码,该编码方式具有任意 2 个相邻数只有一位二进制数不同且两个边界值之间也仅有一位二进制数不同的特

点。

设编码长度为 m, n 个待辨识参数的取值范围分别为 $[a_j, b_j]$,把每个范围等分成 $2^m - 1$ 个子区间,则待辨识特征参数可表示为

$$c_j = a_j + E_j d_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

其中
$$d_j = \frac{b_j - a_j}{2^m - 1}$$

式中 d_j ——子区间长度

E_j ——搜索步数,为小于 2^m 的任意十进制非负整数

搜索步数 E_j 可以用 n 个 m 位格雷码数组 $\{g(j, k) | k = 1, 2, \dots, m\}$ 表示为

$$E_j = \sum_{k=1}^m \left(\bigoplus_{i=k}^m g(j, i) \right) 2^{k-1} \quad (9)$$

式中 \oplus ——异或运算符

这样待辨识特征参数的解空间与基于格雷码数组建立的遗传算法搜索空间具有一一对应的关系。

初始种群的产生:传统的初始种群是随机产生的,可能导致初始种群在解空间中分布不均匀,从而影响算法的性能。采用文献[18]介绍的以广义海明距离为判据的均匀初始种群产生法,要求入选种群的所有个体之间的广义海明距离 G 必须大于等于某个设定的值,设种群的规模大小为 N ,即

$$G_{ij} \geq (m - l) \quad (i, j = 1, 2, \dots, N; i \neq j) \quad (10)$$

其中 $l = \text{int}(m/2)$

式中 G_{ij} ——两个个体之间的广义海明距离

l ——雷码编码的设定常数

m ——编码长度

初始种群采取这种产生方式能保证随机产生的各个体间有较明显的差别,从而增加搜索收敛于全局最优解的可能。

种群的大小 N 影响着算法的有效性,当 N 太小时,算法会很差或找不出问题的解;而 N 太大时,算法收敛速度减慢。本文设定 $N = 3m$ 。

确定个体评价方法:设 ESP 液压系统模型某时刻输出的制动轮缸压力向量为 \hat{y}_i ,真实系统在同样条件下测量到的制动轮缸压力向量为 y_i ,定义二者的误差向量欧氏范数为

$$\| \varepsilon_i \|_2 = \| \hat{y}_i - y_i \|_2 \quad (11)$$

基于式(11)得到一段观测时间内所有观测点上误差向量欧氏范数的和为

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n \| \varepsilon_i \|_2 \quad (12)$$

准确的辨识结果应该使 ε 取极小值,个体适应度 F 可定义为

$$F = \frac{1}{1 + \varepsilon} \quad (13)$$

选择运算: 为保证最优个体有较大概率被选择, 最差个体被淘汰, 避免遗传算法过早收敛现象和停滞现象产生, 本文采用锦标赛选择算子^[19], 即先随机地在群体中选择 k 个个体进行适应度比较, 将其中适应度最高的个体遗传到下一代, 这个过程重复 n 次就产生了新的种群。

交叉和变异运算: 这 2 个算子对遗传算法的收敛性起决定性作用。为避免算法发散和陷入局部极小, 本文采用自适应方法调整交叉概率 p_c 和变异概率 p_m , 计算方法为^[20]

$$\begin{cases} p_c = \frac{F_0 - F'}{F_0 - F} \\ p_m = \frac{F_0 - F}{2(F_0 - F)} \end{cases} \quad (14)$$

式中 \bar{F} ——种群的平均适应度
 F ——个体的适应度
 F_0 ——种群的最大适应度
 F' ——用来交叉的个体中的最大适应度

3 ESP 液压系统模型参数辨识

为获取 ESP 液压系统模型参数辨识的试验数据, 在实车的 ESP 液压系统入口、左前制动轮缸入口和右后制动轮缸入口分别装配压力传感器和流量传感器, 如图 1 所示。

ESP 液压系统根据电磁阀和液压泵的工作情况可分为常规制动工作模式、被动增压工作模式和主动增压工作模式。常规制动工作模式下, 制动踏板动作建立压力源, 电磁阀和液压泵均未动作, 制动主缸压力与制动轮缸压力保持一致; 被动增压工作模式下, 制动踏板动作建立压力源, 增压阀和减压阀动作实现制动轮缸压力的控制, 液压泵动作吸出低压蓄能器的制动液; 主动增压工作模式下, 制动踏板未动作, 限压阀从常通状态切换到限压状态, 吸入阀打开, 液压泵动作建立压力源, 增压阀和减压阀动作实现制动轮缸压力的控制, 液压泵动作吸出低压蓄能器的制动液。

在如图 2 所示的实车测试环境下进行常规制动工况和 ABS 工况来获取 ESP 液压系统的常规制动工作模式和被动增压工作模式下的试验数据。同时, 通过诊断工具控制液压泵和电磁阀, 实现制动轮缸按照不同的增压速率建立压力, 进而得到 ESP 液压系统在主动增压工作模式下的试验数据。

采用实车测试环境下的试验数据, 基于遗传算法辨识 ESP 液压系统模型的特征参数, 辨识结果如表 2 所示。

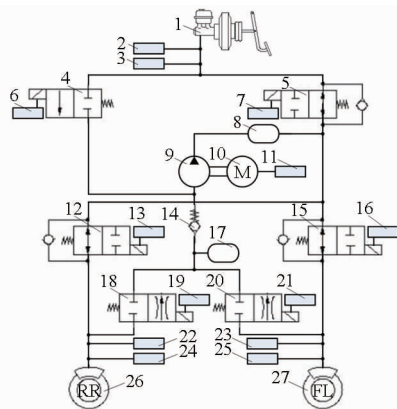


图 1 实车 ESP 液压系统及传感器装配位置结构图

Fig. 1 Structure block of vehicle ESP hydraulic system and fitting positions of sensors

1. 制动主缸 2. 制动主缸压力传感器 3. 制动主缸流量传感器
4. 吸入阀 5. 限压阀 6. 吸入阀电流传感器 7. 限压阀电流传感器
8. 高压阻尼器 9. 液压泵 10. 电动机 11. 电动机电压传感器
12. 右后轮增压阀 13. 右后轮增压阀电流传感器
14. 单向阀 15. 左前轮增压阀 16. 左前轮增压阀电流传感器
17. 低压蓄能器 18. 右后轮减压阀 19. 右后轮减压阀电流传感器
20. 左前轮减压阀 21. 左前轮减压阀电流传感器 22. 右后轮压力传感器
23. 左前轮压力传感器 24. 右后轮流量传感器 25. 左前轮流量传感器
26. 右后轮制动轮缸 27. 左前轮制动轮缸



图 2 实车测试场景

Fig. 2 Vehicle test scenario

表 2 ESP 液压系统模型的特征参数辨识结果

Tab. 2 Identification results of characteristic parameters for ESP hydraulic system model

参数	数值
左前轮增压阀系数 $K_{FLV}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-7})$	1.621×10^{17}
左前轮减压阀系数 $K_{FLAV}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-7})$	4.520×10^{14}
右后轮增压阀系数 $K_{RRV}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-7})$	8.362×10^{16}
右后轮减压阀系数 $K_{RRAV}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-7})$	4.630×10^{14}
限压阀系数 $K_{LSV}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-7})$	6.4991×10^{15}
吸入阀系数 $K_{HSV}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-7})$	2.126×10^{14}
高压阻尼器系数 $C_{0,H}/\text{m}^3$	4.308×10^7
低压蓄能器系数 $C_{0,L}/\text{m}^3$	1.3345×10^8
液压泵系数 $C_1/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1})$	3.5632×10^{-7}
左前制动轮缸系数 $C_{2,FL}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	-7.1092×10^6
左前制动轮缸系数 $C_{3,FL}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-5})$	8.4034×10^{12}
右后制动轮缸系数 $C_{2,RR}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	-6.814×10^6
右后制动轮缸系数 $C_{3,RR}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-5})$	1.457×10^{13}

4 ESP 液压系统模型符合度验证

为验证 ESP 液压系统模型的符合度,基于图 2 所示的实车测试环境进行常规制动工况、ABS 工况和主动增压工况来获取实车参考数据。采用表 2 所示的特征参数辨识结果参数化 ESP 液压系统模型,并将其编译、下载至 dSPACE AutoBox 实时仿真机。

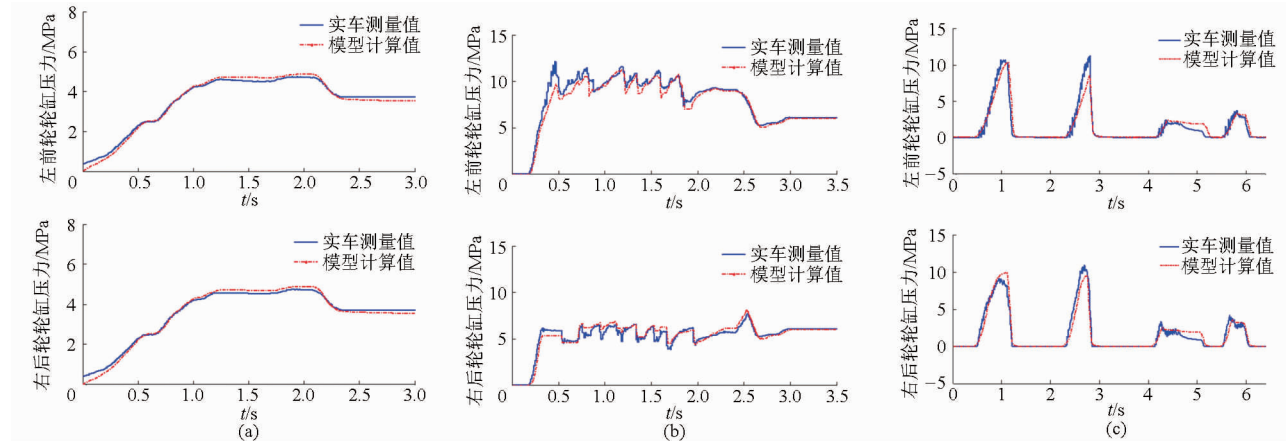


图3 轮缸压力对比曲线

Fig.3 Contrast curves of wheel cylinder pressures

(a) 常规制动工况 (b) ABS 工况 (c) 主动增压工况

分为常规制动工作模式、被动增压工作模式和主动增压工作模式。上述 3 种验证工况涵盖了 ESP 液压系统的所有工作模式,因此只要这 3 种验证工况下的 ESP 液压系统模型符合度满足构建 ESP 系统硬件在环仿真测试环境的需求,基于遗传算法进行特征参数辨识得到 ESP 液压系统模型即满足需求。计算图 3 所示的实车参考数据中的制动轮缸压力信号和 ESP 液压系统模型计算输出的制动轮缸压力信号的符合度为

$$f = \left(1 - \frac{\|\hat{y} - y\|_2}{\|y - \bar{y}\|_2} \right) \times 100\% \quad (15)$$

式中 y ——实车参考数据中的制动轮缸压力信号序列

\bar{y} ——实车参考数据中的制动轮缸压力信号序列的平均值

\hat{y} ——ESP 液压系统模型计算输出的制动轮缸压力信号序列

图 3a 所示的常规制动工况条件下,实车参考数据中的制动轮缸压力信号和 ESP 液压系统模型计算输出的制动轮缸压力信号的符合度为 98.18%;图 3b 所示的 ABS 工况条件下,实车参考数据中的

提取实车参考数据中 ESP 液压系统的电动机电压信号、电磁阀控制器信号和制动主缸压力信号,将其作为 ESP 液压系统模型的输入。提取实车参考数据中的制动轮缸压力信号,将其和 ESP 液压系统模型计算输出的制动轮缸压力信号进行对比,结果如图 3 所示。

ESP 液压系统根据电磁阀和液压泵的工作情况

制动轮缸压力信号和 ESP 液压系统模型计算输出的制动轮缸压力信号的符合度为 87.36%;图 3c 所示的主动增压工况条件下,实车参考数据中的制动轮缸压力信号和 ESP 液压系统模型计算输出的制动轮缸压力信号的符合度为 82.51%。对比 3 种验证工况的符合度,随着电磁阀和液压泵动作数量的增加,ESP 液压系统模型计算制动轮缸压力信号过程中涉及到表 2 所示特征参数的数量随之增加,其符合度逐渐降低,但均满足构建 ESP 系统硬件在环仿真测试环境的需求。

5 结论

(1) 基于 ESP 液压系统的结构原理,在 Matlab/Simulink 环境下建立其实时仿真模型,并采用遗传算法对 ESP 液压系统模型的电磁阀、制动轮缸、液压泵和电动机的特征参数进行辨识。

(2) 通过对比不同试验工况的实车测试采集的制动轮缸压力信号和 ESP 液压系统模型计算输出的制动轮缸压力信号,验证了特征参数辨识之后的模型具有较高的符合度,可用于构建 ESP 系统硬件在环仿真测试环境。

参 考 文 献

- 1 Liebemann E K, Meder K, Schuh J, et al. Safety and performance enhancement; the bosch electronic stability control[C]. SAE Paper 2004-21-0060, 2004.
- 2 Hans-Jurgen Witter, Martin zur Heiden, Kumar Talwar. ABS/ESP ECU testing with sophisticated HIL simulation methods[C].

- SAE Paper 2009-26-0079, 2009.
- 3 Manco S, Nervegna N, Brunelli M. Modelling the ABS/ESP electro-hydraulic system for vehicle stability control [C] // 18th International Conference on Hydraulic and Pneumatics, 2003: 422-437.
 - 4 Wookjin Choi, Hwan Park, Sangcheol lee. Research on the method of improving the pump system [C]. SAE Paper 2004-01-0258, 2004.
 - 5 O'Dea K. Anti-lock braking performance and hydraulic brake pressure estimation [C]. 2005 SAE World Congress, 2005.
 - 6 Qi Xuele, Song Jian, Wang Huiyi. Influence of hydraulic ABS parameters on solenoid valve dynamic response and braking effect [C]. SAE Paper 2005-01-1590, 2005.
 - 7 李亮, 宋健, 韩宗奇, 等. 用于电子稳定程序在线控制的液压模型和反模型 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(2): 139-144.
Li Liang, Song Jian, Han Zongqi, et al. Hydraulic model and inverse model for electronic stability program online control system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(2): 139-144. (in Chinese)
 - 8 朱冰, 赵健, 李静, 等. 面向底盘集成控制的液压制动压力估算方法 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009, 39(增刊): 22-26.
Zhu Bing, Zhao Jian, Li Jing, et al. Hydraulic brake pressure estimation for integrated chassis control [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(Supp.): 22-26. (in Chinese)
 - 9 马吉恩, 徐兵, 杨华勇. 轴向柱塞泵流量特性理论建模与试验分析 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 188-194.
Ma Jien, Xu Bing, Yang Huayong. Modeling and experiment study on fluid character of axial piston pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 188-194. (in Chinese)
 - 10 王伟玮, 宋健, 李亮, 等. ESP 液压执行单元柱塞泵动态特性仿真与试验 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 1-5, 14.
Wang Weiwei, Song Jian, Li Liang, et al. Dynamics characteristic simulation and test of pump of hydraulic control unit of ESP [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 1-5, 14. (in Chinese)
 - 11 Manro Velardocchia. A methodology to investigate the dynamic characteristics of ESP and EHB hydraulic units [C]. SAE Paper 2006-01-1281, 2006.
 - 12 文超, 张永强, 施光林. 典型 ESP 液压系统的 AMESim 建模与动态特性分析 [J]. 流体传动与控制, 2011, 44(1): 1-4.
Wen Chao, Zhang Yongqiang, Shi Guanglin. AMESim modeling and analysis of dynamic characteristics on a typical ESP hydraulic system [J]. Fluid Power Transmission and Control, 2011, 44(1): 1-4. (in Chinese)
 - 13 孟爱红, 王治中, 宋健, 等. 汽车 ESP 液压控制单元关键部件建模与系统仿真 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 1-5.
Meng Aihong, Wang Zhizhong, Song Jian, et al. Critical component modeling and system simulation of hydraulic control unit of automotive electronic stability program [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 1-5. (in Chinese)
 - 14 梅晓榕, 柏桂珍, 张卯瑞. 自动控制元件及线路 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 28-50.
 - 15 金鸿章, 王科俊, 何琳. 遗传算法理论及其在船舶横摇运动控制中的应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007: 10-16.
 - 16 吴玫, 陆金桂. 遗传算法的研究进展综述 [J]. 机床与液压, 2008, 36(3): 176-179, 172.
Wu Mei, Lu Jingui. Summary of research progress of the genetic algorithms [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(3): 176-179, 172. (in Chinese)
 - 17 高强, 吕文芝, 杜小山, 等. 遗传算法优化性能评价准则研究 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(7): 803-806.
Gao Qiang, Lü Wenzhi, Du Xiaoshan, et al. Evaluation for genetic algorithm performance [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(7): 803-806. (in Chinese)
 - 18 Wolfe R, Sandler W. An algorithm for detection using digital image analysis [J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(2): 641-644.
 - 19 夏桂梅, 曾建潮. 基于锦标赛选择遗传算法的随机微粒群算法 [J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(4): 51-53.
Xia Guimei, Zeng Jianchao. Stochastic particle swarm optimization algorithm based on genetic algorithm of tournament selection [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(4): 51-53. (in Chinese)
 - 20 陈长征, 王楠. 遗传算法中交叉和变异概率选择的自适应方法及作用机理 [J]. 控制理论与应用, 2002, 19(1): 41-43.
Chen Changzheng, Wang Nan. Adaptive selection of crossover and mutation probability of genetic algorithm and its mechanism [J]. Control Theory and Applications, 2002, 19(1): 41-43. (in Chinese)