

# 电控空气悬架电流闭环控制系统开发

董传平<sup>1</sup>, 李军伟<sup>1\*</sup>, 周英超<sup>1</sup>, 张广世<sup>2</sup>, 李凯<sup>2</sup>, 岳涵<sup>2</sup>, 单坤山<sup>3</sup>

1. 山东理工大学 交通与车辆工程学院, 山东 淄博 255049;

2. 天润智能控制系统集成有限公司, 山东 文登 264413; 3. 潍柴雷沃重工股份有限公司, 山东 潍坊 261206

**摘要:**为实现对电控空气悬架阻尼的精准调节,以 MC9S12XEP100 单片机为核心部件,设计基于 A3942 四通道高边栅极驱动器和采用增量式比例积分微分(proportion integral differential, PID)控制算法的电流闭环控制系统,开发故障诊断系统,通过实际应用测试系统对空气悬架阻尼的调节及闭环控制。结果表明:电流闭环控制系统能够实现空气悬架比例电磁阀驱动电流的精确控制,误差控制在 $\pm 3$  mA 以内,能够精确控制空气悬架阻尼;故障诊断系统能够实时显示当前故障状态及维修建议。该系统可以为空气悬架阻尼的精准调节提供参考。

**关键词:**空气悬架;增量式 PID;电流闭环控制;A3942;MC9S12XEP100

中图分类号:TP368.1;U463.3

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)02-0080-07

**引用格式:**董传平,李军伟,周英超,等.电控空气悬架电流闭环控制系统开发[J].内燃机与动力装置,2022,39(2):80-86.

DONG Chuanping, LI Junwei, ZHOU Yingchao, et al. Development of current closed loop control system for electronically controlled air suspension [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022, 39(2):80-86.

## 0 引言

悬架是连接车身与车桥之间的重要部件,能够很大程度缓解来自路面的振动。相比于传统的钢板弹簧,空气悬架具有振动低、刚度和阻尼可调、使用寿命长等诸多优点<sup>[1]</sup>。21 世纪以来,随着汽车电子技术的不断发展,电控空气悬架系统(electrically controlled air suspension, ECAS)能够实现刚度、阻尼等自动调节,具有良好的自适应性和主动性<sup>[2-5]</sup>,满足人们对舒适性和行驶平顺性的要求,已经成为未来新型主动悬架的发展方向<sup>[6]</sup>。

传统的空气悬架使用开环控制系统,无法根据外部激励实时调整电磁阀的驱动电流,本文中设计一种基于增量式比例积分微分(proportion integral differential, PID)的电流闭环控制系统,通过调节空气悬架内比例电磁阀电流,实现对空气悬架阻尼的精准调节。

## 1 系统硬件电路设计

### 1.1 MC9S12XEP100 单片机最小系统硬件设计

空气悬架工作环境恶劣,需要在不同温度、湿度等复杂的环境因素下工作,其控制系统应采用能够适

收稿日期:2021-11-12

基金项目:山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010911)

第一作者简介:董传平(1997—),男,济南人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车控制技术, E-mail: 1141072425@qq.com。

\* 通信作者简介:李军伟(1964—),男,河南平顶山人,工学博士,教授,主要研究方向为电动汽车关键控制技术, E-mail: ljwhitt@163.com。

应恶劣工作环境、具有可靠性能的控制器的。为了增加可靠性、降低生产成本,主控芯片应具有高性能、低成本和低功耗等优势,还应集成脉宽调制(pulse width modulation, PWM)模块、高精度的模数(analog to digital, A/D)转换模块以及串行通信(serial peripheral interface, SPI)端口等功能模块。因此,选择16位微控制器MC9S12XEP100作为主控芯片。MC9S12XEP100具有16位微控制器的优势,同时又具有堪比32位微控制器的高性能,8通道PWM满足使用需求,2个16通道、12位A/D转换器可以保证A/D采集的准确性。

最小系统是单片机维持内部运行所要求的最简单电路。采用频率为4 MHz的晶振输出稳定的时钟信号提供给主控芯片,写入器接口电路可以在程序开发过程中擦除和下载微控制器内的程序、在线调试、观测变量的变化等,复位电路中RESET引脚常接VCC,当RESET引脚被拉低时可以使单片机强制复位。

### 1.2 电源模块设计

由于车载蓄电池的输出电压为12 V,应通过降压芯片将12 V电压转换为5 V,供主控芯片及各子模块使用。电源供电电路原理如图1所示,其中U1为TPS5430模块,为降压稳压器,内部包含过流限制、过压保护和热关断保护功能<sup>[7-10]</sup>,该芯片运行的外部环境温度为-40~125℃,能够将5.5~36.0 V的输入电压稳定地输出为5 V;比例电磁阀需要12 V电压驱动,图中Q<sub>2</sub>为P沟道MOS管,Q<sub>1</sub>为三极管,MOS管的源极VBAT连接车载蓄电池,栅极通过电阻连接到三极管的集电极,BoradPwrON连接到控制器主控芯片的输入输出(input output, IO)口,只有当BoradPwrON端口接收到来自主控芯片的高电平时,MOS管的漏极VBAT\_PO才输出12 V电压。

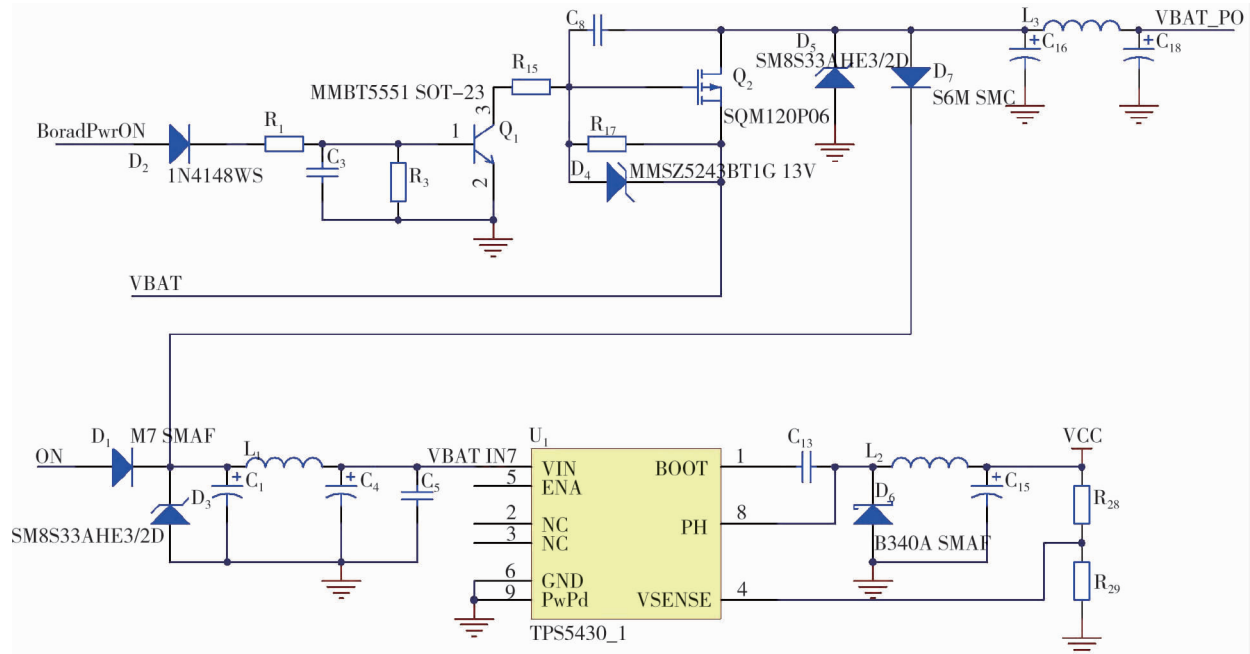


图1 电源供电电路原理图

### 1.3 A3942 四通道高边栅极驱动器电路设计

A3942 四通道高边栅极驱动器是一款高度集成的栅极驱动器,串行外设接口 SPI 的兼容性可以使该装置轻松地集成到现有的硬件电路中。A3942 外围电路原理如图2所示,图中U<sub>4</sub>为A3942模块,SDO、SDI、CSZ和SCLK为SPI端口,可以进行输出控制以及故障诊断,FAULT引脚用来指示故障,通过电阻R<sub>16</sub>上拉到VCC,当内部出现故障时FAULT引脚输出低电平,将A3942\_FAULT引脚拉低,当控制器检测到A3942\_FAULT引脚为低电平时则表示A3942内部发生故障;ENB引脚控制使能输出;IN<sub>1</sub>~IN<sub>4</sub>为输入引脚,G<sub>1</sub>~G<sub>4</sub>为输出引脚。以第一路通道为例介绍A3942模块的连接情况,IN<sub>1</sub>连接主控芯片PWM输出,G<sub>1</sub>连接MOS管的栅极,S<sub>1</sub>连接MOS管的源极,D<sub>1</sub>连接MOS管的漏极,U<sub>2</sub>为AD8211模块。

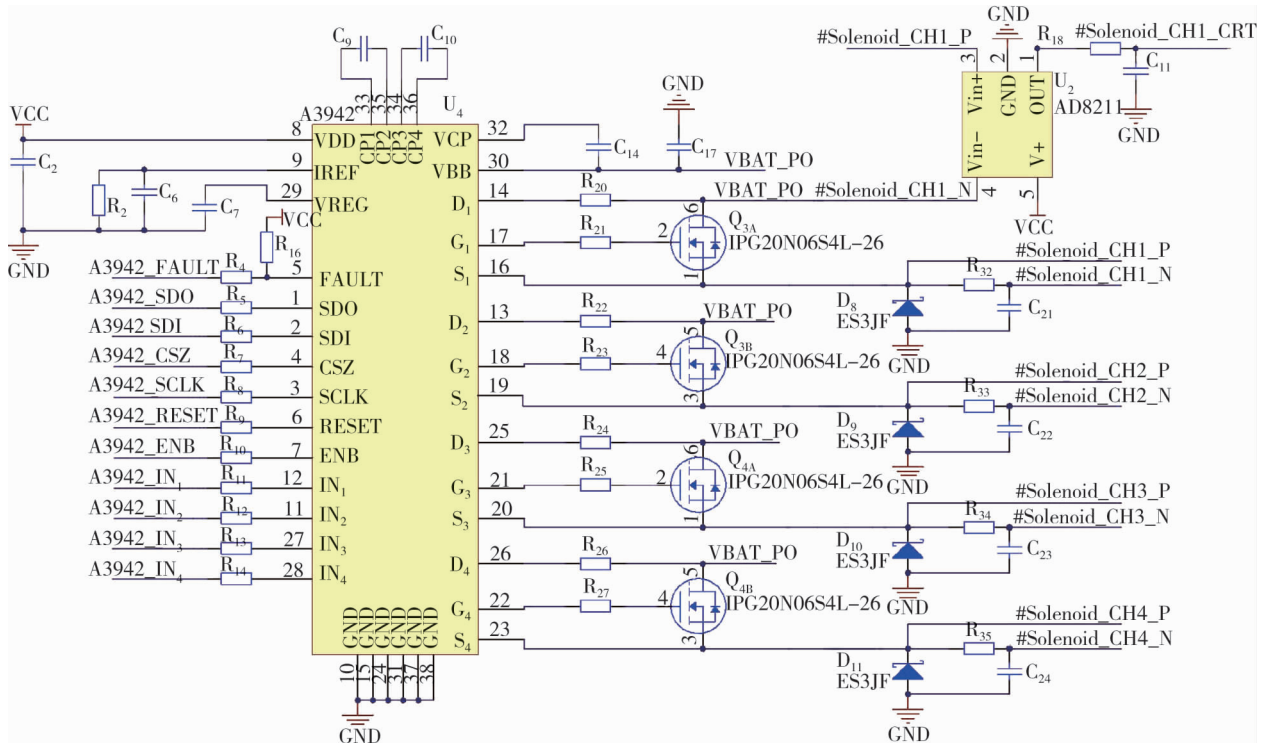


图2 A3942 外围电路原理图

电控空气悬架电流闭环控制系统主要通过电子控制单元(electronic control unit, ECU)为比例电磁阀驱动电路输出不同占空比的 PWM 信号,不同电流下比例电磁阀开度不同,从而控制油液的流动,实现电控空气悬架的阻尼调节。车载速度传感器与加速度传感器采集当前车身的速度和加速度,ECU 根据当前车身速度与加速度计算出当前状态下空气悬架的期望阻尼,根据比例电磁阀的特性,通过阻尼与电流之间的对应关系求解出期望的阻尼所对应的电流。AD8211 将连接电磁阀电路检测电阻的 2 个引脚(#Solenoid\_CH1\_P、#Solenoid\_CH1\_N)之间的压差放大 20 倍,通过#Solenoid\_CH1\_CRT 引脚输出电压信号给主控芯片,主控芯片通过 A/D 采集结果计算出当前驱动电路中的实际电流作为反馈值,该反馈值与电流的期望值进行比较得出电流偏差,通过 PID 进行调节,实现比例电磁阀电流的闭环控制。

## 2 软件设计

### 2.1 SPI 模块配置

主控芯片通过 SPI 与 A3942 模块通信来控制输出以及诊断故障。A3942 模块 SPI 通信的时钟频率最高为 8 MHz,要求时钟极性和时钟相位相应的寄存器值均设置为 0。

对 SPI 模块进行初始化配置时,首先通过读取状态寄存器和数据寄存器将接收标志位清 0,然后通过配置波特率寄存器的分频因子设置 SPI 波特率,通过 SPI 控制寄存器设置时钟极性、时钟相位、主机模式和高位先发等配置。

### 2.2 A/D 模块配置

主控芯片采集车身速度传感器和加速度传感器信号,计算当前空气悬架的期望阻尼;采集 AD8211 模块信号,计算当前电磁阀电路中电流作为 PID 的反馈;因此电流采集模块的精确性直接影响电流闭环控制系统控制效果。

MC9S12XEP100 提供 16 通道、12 位的高精度 A/D 模块,初始化 A/D 模块时,通过控制寄存器设置采用的时间和频率,配置采用精度。对电磁阀驱动电路电流进行 A/D 信号采集时,先进行中值滤波再进行均值滤波,降低干扰信号对控制系统的影响。

### 2.3 PWM 模块配置

主控芯片产生不同占空比的 PWM 信号驱动电磁阀,MC9S12XEP100 拥有 8 个独立的可编程周期和占空比的 PWM 通道。2 个 8 位的 PWM 通道可编程实现联结为 16 位分辨率,带有可编程的中心对齐输出模式和左对齐输出模式,拥有 4 个可供选择的时钟源,可以实现宽范围的时钟频率配置。

初始化 PWM 模块时,首先应通过寄存器设置时钟频率,选择时钟源,设置输出对齐方式以及 PWM 的脉冲极性。

### 2.4 增量式 PID 控制算法

PID 及其衍生算法是目前国际上应用最广泛的控制算法之一,相对其他控制算法简单,参数易于调整,广泛应用于工业控制领域。PID 控制器包括 3 部分:比例环节、积分环节和微分环节<sup>[11]</sup>。比例环节能够快速降低误差,但是在稳态后容易产生稳态误差;积分环节通过对误差进行累计,使稳态误差逐步缩小;微分环节对误差的变化趋势进行预测,避免超调<sup>[12-13]</sup>。本系统 PID 的控制原理如图 3 所示,其中执行机构由 A3942 模块及外围 MOS 管等电路组成,测量元件由 AD8211 模块及主控芯片的 A/D 采集模块组成。

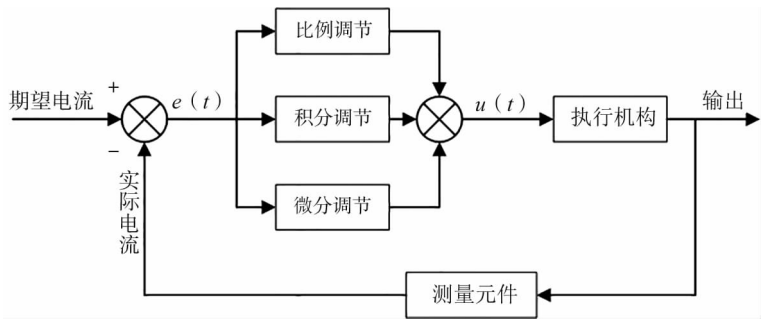


图3 控制原理图

PID 控制算法的表达式为:

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{K_i} \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}] , \quad (1)$$

式中:  $u(t)$  为控制器输出的控制量,为 PWM 的占空比;  $e(t)$  为电流偏差,等于期望电流与实际电流的差;  $K_p$  为比例环节权重;  $K_i$  为积分时间常数;  $K_d$  为微分时间常数;  $t$  为时间, s。

电控空气悬架系统属于离散系统,所以采用离散化 PID 控制,其表达式为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \sum_{j=0}^t e(j) + K_d [e(t) - e(t-1)] . \quad (2)$$

根据式(2)可以得出增量式 PID 表达式为:

$$\Delta(u(t)) = K_p [e(t) - e(t-1)] + K_i e(t) + K_d [e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)] . \quad (3)$$

增量式 PID 没有误差累计,  $\Delta(u(t))$  只与最近 3 次的电流偏差有关,当系统出现问题时不会严重影响系统工作,容易获得较好的控制效果。

PID 控制程序需要周期执行,理论上执行周期时间越短控制效果越好。经实际测试,PID 控制程序执行时间约为 0.25 ms,在实际应用中,控制器还需要对其他信息进行处理,综合考虑控制器负载情况,将 PID 控制程序执行周期设为 2 ms,既可以获得较好的控制效果,又使得控制器的负载率不至于过高,PID 的控制流程如图 4 所示。

## 3 电流闭环控制系统功能测试

为了验证所设计的电流闭环控制系统的准确性与可靠性,对所设计的电流闭环控制系统进行了功能完整性测试。在实验室搭建功能测试硬件平台,在比例电磁阀驱动电路中串联高精度的电流表,实时观测当前电路中的电流,方便与设定电流进行比较;并在试验台架搭建了功能测试平台,主要对所设计的电

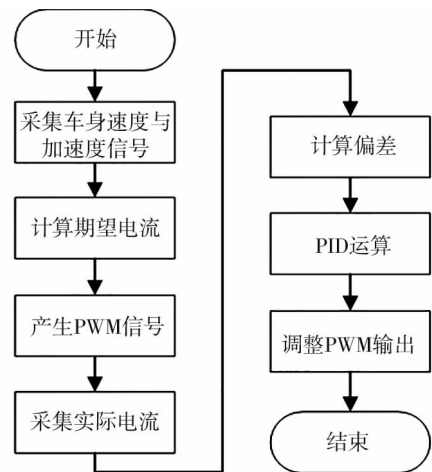


图4 PID 控制流程图

流闭环控制系统能否准确控制产生期望的电流进行测试。

在确保线路正确连接的情况下接通电源,采用试凑法对 PID 参数进行整定,3 组不同的 PID 参数下稳态电流的变化情况如图 5 所示。

由图 5 可知:第一组参数下的实际电流最为稳定,其电流全部落在了允许的误差范围之内,其余 2 组参数的实际电流均超出误差允许范围,选择第一组参数作为 PID 的控制参数。

PID 的动态特性在实际应用中至关重要,为了观测 PID 的动态特性,设置期望电流为 500 mA,记录电流变化情况如图 6 所示。

由图 6 可知,经过 40 ms 系统趋于稳定,实际电流维持在 497~503 mA,满足调节时间为 60 ms 和误差为 $\pm 3$  mA 的要求。

为了验证该组参数的性能,在同一组 PID 控制参数下对 300~1200 mA 电流进行调节,将测试电流与设定的期望电流进行比较,部分测试数据和期望电流比较如表 1 所示。

由表 1 可知:通过该组 PID 控制参数调节的电流闭环控制系统能够将比例电磁阀驱动电路的电流误差维持在 $\pm 3$  mA 以内,从而实现对空气悬架阻尼的精准调节。

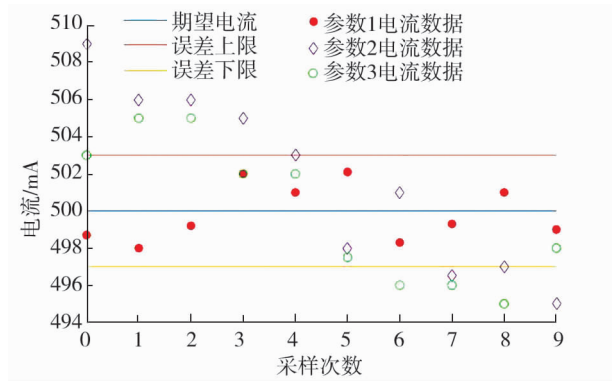


图 5 不同参数下电流对比

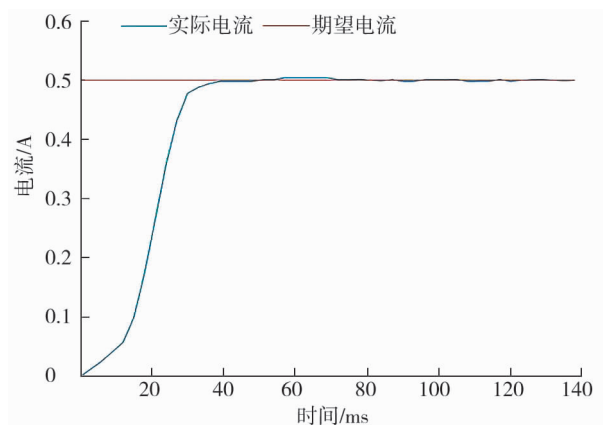


图 6 电流动态特性

表 1 部分测试数据与期望电流

期望电流	实际电流	误差	期望电流	实际电流	误差
300	301.65	1.65	800	801.62	1.62
350	349.41	-0.59	850	849.33	-0.67
400	402.02	2.02	900	900.97	0.97
450	451.25	1.25	950	949.64	-0.36
500	498.96	-1.04	1000	1001.25	1.25
550	549.12	-0.88	1050	1049.67	-0.33
600	601.52	1.52	1100	1101.32	1.32
650	649.28	-0.72	1150	1149.71	-0.29
700	700.66	0.66	1170	1171.23	1.23
750	749.21	-0.79	1200	1198.55	-1.45

## 4 故障检测系统设计

### 4.1 故障寄存器

A3942 四通道高边栅极驱动器具有丰富的故障检测功能,输出故障寄存器为 8 位数据寄存器,通过 SPI 将内部故障寄存器中的数据发送出来。

故障寄存器的  $D_0$  是短接至地(short-to-ground, STG)故障位,每路 MOS 管的漏极到源极的电压都会受到监控。在测试 STG 故障时,将 MOS 管的源极接地,读取 A3942 模块 SPI 端口发送的数据,若  $D_0$  为

1,表示检测到STG故障。

故障寄存器的 $D_1$ 为短接至电源(short-to-battery,STB)故障位,首先配置引脚或者通过SPI将A3942模块栅极驱动输出关闭,如果 $S_x$ 引脚的电压超过阈值电压,则会锁存STB故障。当某个通道的STB故障被锁存时,该通道的栅极驱动输出被禁止,直至故障位被清除(通过输入寄存器 $D_3$ )或者状态故障诊断被屏蔽(通过输入寄存器 $D_4$ )。在测试STB故障时,将MOS管的源极接12V电源,读取A3942模块SPI端口发送的数据,若 $D_1$ 为1,表示检测到STB故障。

故障寄存器的 $D_2$ 为负载开路(open load,OL)故障位,一个小的偏置电流从通道的 $S_x$ 引脚流出,如果负载开路, $S_x$ 引脚的电压将上升到OL故障检测阈值以上,模块锁存OL故障。当某通道的OL故障被锁存时,该通道的栅极驱动输出被禁止,直至故障位被清除(通过输入寄存器 $D_3$ )或者状态故障诊断被屏蔽(通过输入寄存器 $D_4$ )。测试OL故障时,将比例电磁阀电路断开,读取A3942模块SPI端口发送的数据,若 $D_2$ 为1,表示检测到OL故障。

故障寄存器的 $D_3$ 为热警告故障位,A3942芯片上集成了一个管芯温度监视器。如果芯片温度接近最大允许水平,将触发热警告信号。在测试热警告故障时,使用热风枪持续加热A3942模块一段时间,读取A3942模块SPI端口发送的数据,若 $D_3$ 为1,表示检测到热警告故障。

故障寄存器的 $D_4$ 为电荷泵欠压故障位,电荷泵必须保持一个高于VBB的电压保护带,以便在需要打开MOS管时为栅极充电。如果在电荷泵上检测到欠压条件,所有输出将被禁用。测试时将A3942的供电电压降低,读取A3942模块SPI端口发送的数据,若 $D_4$ 为1,表示检测到电荷泵欠压故障,在实际测试中,当A3942芯片的供电低于4V时,则锁存电荷泵欠压故障。

## 4.2 软件设计

为了方便对系统进行故障诊断,通过Python设计了一款故障诊断系统上位机软件,通过控制器局域网络(controller area network,CAN)总线与控制器通信,并将故障数据进行解析。电流闭环控制故障诊断软件连接测试界面如图7所示。将控制器通过CAN卡与上位机连接,选择合适的波特率之后点击“打开CAN卡”按钮即可初始化CAN卡配置,点击“连接测试”按钮即可测试当前通信的连接状态。当需要对某个通道进行诊断时,下拉菜单选择想要诊断的通道,点击“读取故障”按钮,“诊断状态栏”显示目前通道的故障状态,并附带维修建议,当对当前通道存在的故障做出维修后,点击“清除故障”按钮,即可清除当前通道的故障,以通道1短接至电源为例,读取与清除故障运行结果如图8所示。

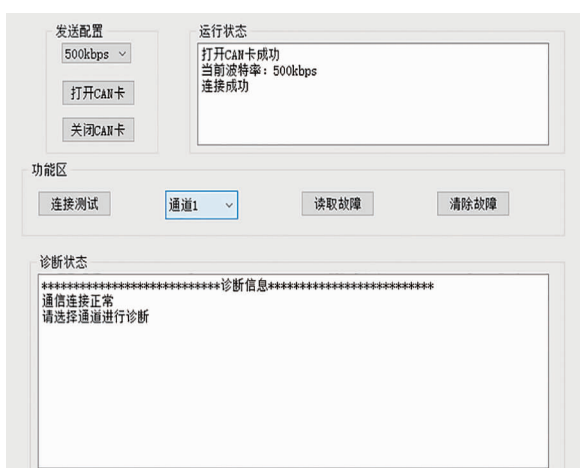


图7 连接测试界面

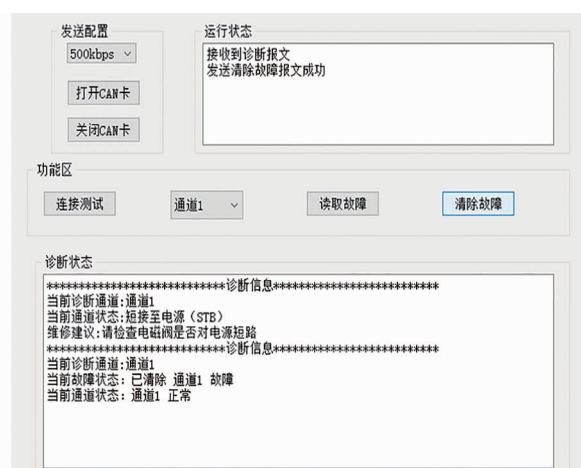


图8 通道1读取故障与清除故障

## 5 结语

基于增量式PID的电控空气悬架电流闭环控制系统,设计了电控空气悬架控制器的硬件电路,实现了增量式PID对比例电磁阀驱动电流的准确调节,电流误差维持在 $\pm 3$  mA之内;开发了故障诊断系统,实

时显示当前故障状态及维修建议。该系统可以精准调节电控空气悬架的阻尼。

### 参考文献:

- [1] 杨辉. 汽车电控悬架的现状与趋势[J]. 装备制造技术, 2013(4): 204-206.
- [2] 黄启科. 电控空气悬架控制策略与控制器开发[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.
- [3] 张博强, 赵浩瀚, 冯天培, 等. 电控悬架用可变阻尼减振器动态特性研究[J]. 机械设计与制造, 2021(6): 10-14.
- [4] 吴思键. 可变阻尼减振器动态特性研究及优化设计[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2020.
- [5] 汪少华, 窦辉, 孙晓强, 等. 电控空气悬架车高调节与整车姿态控制研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 335-342.
- [6] 胡琴, 晋民杰, 范英, 等. 电磁阀连续可变阻尼减振器的建模与仿真[J]. 太原科技大学学报, 2016, 37(4): 317-322.
- [7] 胡琴. 电磁阀式连续可变阻尼半主动悬架研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2016.
- [8] 李仕生. 车辆可变阻尼减振器半主动悬架研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [9] 张凯, 焦洪宇, 王鹏. 可变阻尼对汽车悬架系统振动性能影响分析[J]. 常熟理工学院学报, 2011, 25(10): 91-94.
- [10] 王培金, 李军伟, 孙辉安, 等. 基于 S12XDP512 双核微处理器的拖拉机整机控制器 CAN 节点开发[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(4): 63-67.
- [11] LIEBST F, BINDIG S, PRYSTUPA P. Grease-filled torsional vibration damper for agricultural powertrains[J]. Atzoffhighway Worldwide, 2017, 10(2): 18-23.
- [12] RAO T H, RAO M S, APPARAO B V, et al. A study on design and analysis of hybrid vibration damper with energy harvesting and optimal damping effect[J]. Journal of the Institution of Engineers, 2014, 95(2): 97-102.
- [13] 左顺文, 苏晋涛, 宋仕涛. Buck 电路电流闭环的控制设计与仿真[J]. 电子制作, 2021(17): 16-19.

## Development of current closed loop control system for electronically controlled air suspension

DONG Chuanping<sup>1</sup>, LI Junwei<sup>1\*</sup>, ZHOU Yingchao<sup>1</sup>, ZHANG Guangshi<sup>2</sup>,  
LI Kai<sup>2</sup>, YUE Han<sup>2</sup>, SHAN Kunshan<sup>3</sup>

1. School of Traffic and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. Tianrun Intelligent Control System Integration Co., Ltd., Weihai 264413, China;

3. Weichai Lovol Heavy Industry Co., Ltd., Weifang 261206, China

**Abstract:** In order to realize the accurately control the driving current of air suspension proportional solenoid valve, choosing MC9S12XEP100 microcontroller as the core component, based on the current closed-loop control system of A3942 four-channel high-edge gate driver, a current closed-loop control system using incremental proportional integral differential (PID) control algorithm is designed, and a fault diagnosis system is developed. The practical application test is also carried out. The test shows that the designed current closed-loop control system can accurately control the driving current of air suspension proportional solenoid valve, and the error is within  $\pm 3$  mA, which can accurately control the damping of electronic-controlled air suspension, fault diagnosis system can display the current fault status and maintenance suggestions in real time. The system can provide reference for the accurate adjustment of air suspension damping.

**Keywords:** air suspension; incremental PID; current closed-loop control; A3942; MC9S12XEP100

(责任编辑: 刘丽君)