

DOI: 10.3901/JME.2011.02.136

ECAS 客车车身高度的实时跟踪*

徐 兴¹ 陈照章¹ 全 力¹ 李仲兴² 周孔亢²

(1. 江苏大学电气信息工程学院 镇江 212013;

2. 江苏大学汽车与交通工程学院 镇江 212013)

摘要: 为实现客车车身高度的精确跟踪, 满足空气悬架控制要求, 设计出一种基于电感式传感器的车身高度跟踪电路, 传感器中的电感与跟踪电路由单片机共同控制, 实现对传感器电感的充放电, 单片机计算不同电感系数下的时间常数, 间接获得实时的客车车身高度。并采用温度补偿电路和低温漂特性元件, 适应客车工作环境温度的变化。设计出专用的滤波处理软件, 既保证了车身动态高度的准确跟踪, 又满足车身高度跟踪实时性的要求。试验表明, 设计的身高度跟踪系统启动后很快达到稳定且跟踪变化值在 1 mm 左右; 当环境温度从 30 °C 上升到 80 °C 的过程中, 跟踪高度的相对误差在 1.9 % 左右, 跟踪最大误差为 5 mm, 能够保证车身高度控制的准确性。

关键词: 客车 电控悬架系统 车身高度 跟踪电路

中图分类号: TP212 U463

Real-time Tracking of Ride Height for Bus with Electronically Controlled Air Suspension

XU Xing¹ CHEN Zhaozhang¹ QUAN Li¹ LI Zhongxing² ZHOU Kongkang²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013;

2. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

Abstract: To exactly track the ride height of bus and satisfy the control demand of air suspension, a height tracking circuit based on the inductance sensor is designed. The inductance of sensor and the designed tracking circuit are jointly controlled by the single chip for the inductance charge-discharge, and the single chip calculates the time constant of different inductance to indirectly obtain the real-time bus height. Temperature compensation and components of low temperature-drift property are adopted to fit the ambient temperature change of the bus. Additionally, a special filtering software is developed to track the dynamic ride height exactly and simultaneously. According to the test results, the height tracking system comes to be stable soon, and the change of ride height is about 1 mm; the relative error is about 1.9% and the max value of tracking error is less than 5 mm when the ambient temperature rises from 30 °C to 80 °C. So, the designed tracking circuit can ensure the veracity of ride height control.

Key words: Bus Electronically controlled air suspension(ECAS) Ride height Tracking circuit

0 前言

随着科技的发展和人们对车辆行驶平顺性、操纵稳定性和舒适性的不懈追求, 国外的各类车辆上已普遍使用空气悬架系统^[1-2]。近年来, 国内各大客车企业也在大力推进中^[3-5]。在电子控制空气悬架(Electronically controlled air suspension, ECAS)系统

中, 路面信息、车速信号、转向信号、车身高度信号等是电控单元(Electronic control unit, ECU)的输入信号, 其中从车身高度信号的变化状况可以推知车辆行驶的状况。在各种车身高度控制模式中, 电控单元 ECU 可以通过车身高度信号以及由此计算的高度变化速度和加速度, 自动地调节悬架的刚度和阻尼, 以达到高质量的平顺性、操纵稳定性和人们乘坐舒适性以及坏路面的通过性。因此车身高度跟踪的正确性及实时性直接关系到 ECAS 性能的好坏。

目前跟踪车身高度有多种不同的方法, SHUICHI 等^[6]采用滑线电阻式高度跟踪系统, 但是

* 浙江省重大科技专项重点(2006C11089)、江苏省科技支撑(BE2008114)和江苏省六大人才高峰资助项目。20100316 收到初稿, 20100912 收到修改稿

运行中易接触不良,影响跟踪的准确性。宋福昌等^[7-8]中采用光电式传感器,其信号只能分级输出、不连续,从而影响精度。杨林等^[9]采用磁阻式无触点传感器,其跟踪结构较复杂、成本高。本文选用 WABCO4410-500110 型电感式高度传感器^[10],并设计相应的车身高高度跟踪电路及滤波处理软件,跟踪系统具有优良的温度特性及获得车身高高度信息的实时性,满足了课题电子控制空气悬架系统的工作要求。

1 441050010 型车用高度传感器

高度传感器的结构及安装示意图如图 1 所示。它是由线圈、可移动铁心及传动机构组成。由图 1 可知,其一端安装在车身上,另一端通过连接杆件安装在车桥上,当车辆运行时,车身的振动使连接杆带动摆杆上下运动,从而移动了铁心,使线圈的电感值发生变化,跟踪电路测得电感变化的对应数值,根据标定系数就可知车身相对于车桥的不同高度。文献[10]标出了摆杆转角(相当于高度变化)和传感器电感及其内含的电阻所决定的时间常数的关系,在跟踪范围内具有良好的线性度,反映出被测高度和电感之间的线性关系。

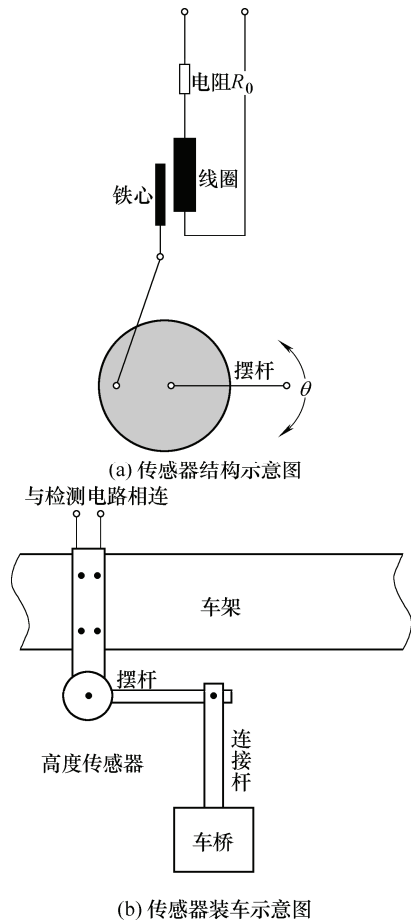


图 1 传感器的结构及安装示意图

2 车身高高度跟踪电路设计

2.1 跟踪电路及其工作原理

跟踪电路采用测传感器时间常数的方法,间接

达到高度跟踪的目的。设计的电路如图 2 所示。电路输入控制端(CONTROL)直接与单片机 I/O 口相连,输出端(OUTPUT)与单片机时基模块端口相连,端口设置成输入捕捉模式,下降沿触发计数结束。

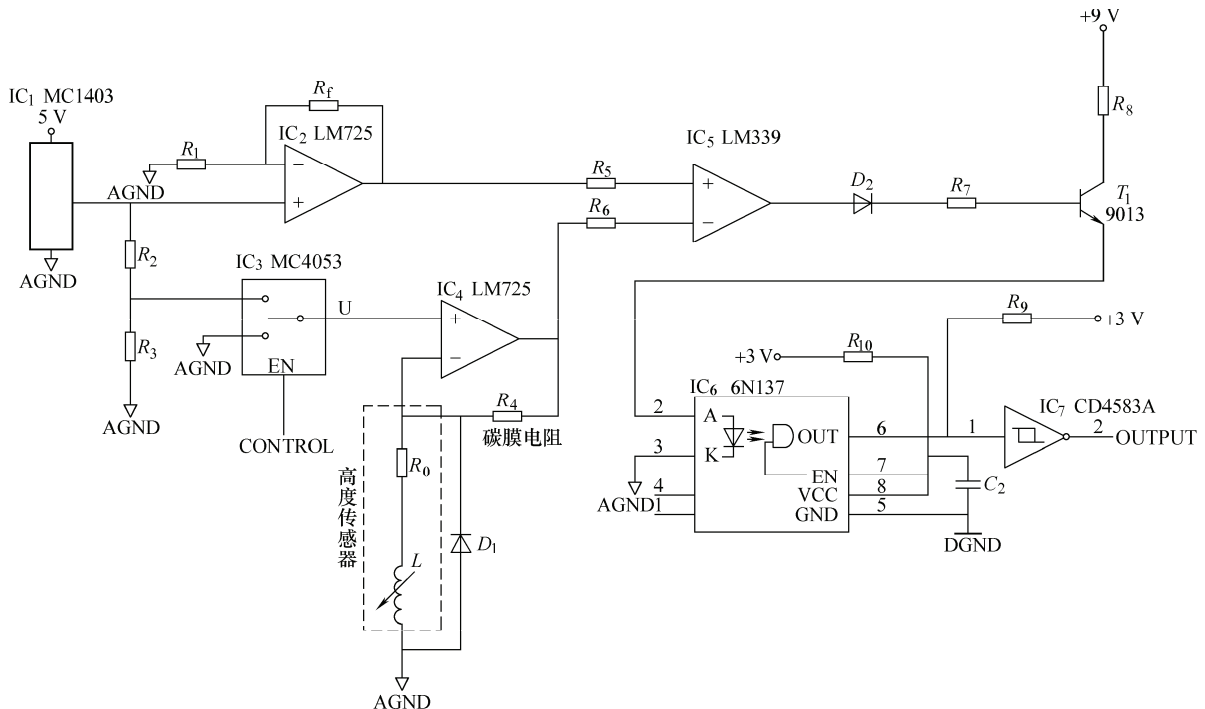


图 2 车身高高度跟踪电路

该电路工作过程如下：一次跟踪完成后，单片机在 CONTROL 端送入高电平，IC₃ 输出电平为 0 V，IC₄ 输出也为 0 V，上次跟踪引起的传感器电感电流通过续流二极管 D₁ 迅速放电，为下次跟踪做准备。而 IC₅ 同相端总是接到由 IC₁ 能源基准电压源 MC1403 输出的基准电压通 IC₂ 定标成 5 V 基准电压。由于此时 IC₄ 输出到 IC₅ 反相端得电压为 0 V，比较器 IC₅ 输出高电平，因此三极管 T₁ 导通，由 R₇ 限定的 6 mA 电流流过高速光耦 IC₆，使其输出低电平，通过 IC₇ 施密特触发器电平转换成高电平 3 V 到输出端 OUTPUT。当一次跟踪开始时(跟踪周期由单片机控制)，单片机输出信号使 CONTROL 端为低电平，同时计数开始。而 IC₃ 输出由 IC₁ 输出电压通过 R₂、R₃ 分压得到的设计电压到 IC₄ 同相端，由于运放工作在线性区，此时 IC₄ 反相端与同相端有相同的电压，高度传感器(等效为 RL 电路)上的电流历经由零逐渐增大的过渡过程。该电流由 IC₄ 输出端通过反馈电阻 R₄ 流过传感器 R₀、L 到地，使比较器 IC₅ 反相端电压不断升高，当达到 5 V 时，比较器 IC₅ 输出由高电平跳变到低电平，T₁ 截止，IC₆ 输出高电平，IC₇ 输出低电平，单片机捕捉到下降沿，计数结束。同时单片机使 CONTROL 端输入高电平，为下次跟踪做准备。此时，单片机中的计数值代表过渡过程中的一段时间，不同的电感值代表不同对应高度，对应了计数时间的不同，因此单片机中计到了不同的数值。

2.2 跟踪电路相关参数的设定

由第 2.1 节所述的跟踪原理可知，过程可理解为阶跃信号激励下的 RL 串联电路(传感器电路)的响应电流，通过 R₄ 转变成 IC₄ 的不断上升的输出电压，此电压与 5 V 电压比较后，去驱动后续的相关执行电路，使单片机产生特定时间段的计数值。为了提高跟踪的精度，单片机的时钟频率要高，即被计数脉冲的周期要小，则计数值大。另外特定时间要相对长，也可提高精度，但该时间和 RL 电路的时间常数 τ 有关。若选得大于 τ 较多时，则此时过渡过程趋于平缓，产生的 IC₄ 输出电压变化趋于缓慢，与 5 V 标准电压比较时，产生的误差较大，即相同电感下，跟踪结果的重复性差；而小于 τ 较多时，跟踪的重复性较好，但计数值较小，精度变差。因此参数选在 τ 时刻附近，使比较器电路翻转，可兼顾重复性和精度。

在比较基准电压设定为 5 V 的情况下，选取 R₄=1 k Ω ，由下边推导，可得跟踪时 IC₄ 同相端的驱动基准电压 U。

传感器由 R₀、L 过渡过程中电流 i_L 的表达式为

$$i_L = I_s \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \right] \quad (1)$$

式中， $I_s = U/R_0$ ， $\tau = L/R_0$ 。IC₅ 的比较电压为 5 V，则 IC₄ 输出 5 V 的比较临界状态时有

$$U + i_L R_4 = 5 \quad (2)$$

由式(1)、(2)，有

$$U + \frac{U}{R_0} \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \right] R_4 = 5 \quad (3)$$

当 $t = \tau$ 时，解式(3)可得 $U = 0.78$ V。该电压可由 R₂、R₃ 对基准电压源分压得到。实际电路中取 $U = 0.8$ V。由于本文所述跟踪电路的充电时间并不是标准的一个时间常数 τ ，而是小于该值，即由式(3)可得

$$t = -\tau \ln \left(1 - (5 - U) \frac{R_0}{UR_4} \right) \quad (4)$$

在跟踪电路中，IC₂、IC₄ 为 LM725，是低温漂高精度运放；IC₅ 为 LM339 电压比较器；IC₃ 为 MC4053 模拟开关；IC₆ 为高速光耦 6N137；IC₇ 为施密特触发器 CD4583；R₅、R₆ 为平衡电阻，和实际电阻温漂相匹配；R₇ 为 T₁ 的偏置电阻；R₄ 为与传感器温度系数匹配的温度补偿电阻。

2.3 跟踪电路温漂分析

ECAS 车身高度跟踪系统的工作温度范围变化大，设计必须要考虑温度对跟踪电路的影响。经测量发现，传感器内的电阻 R₀ 随着温度升高其电阻值降低，其温度系数为负，而在该温度范围下，电感值变化不大，所以时间常数主要受电阻 R₀ 影响。根据式(4)可知，受温度的影响，测量误差较大。显而易见，由式(4)，电阻 R₀ 和电阻 R₄ 的阻值受温度影响必须为同方向变化，因此设计时电阻 R₄ 选用负温度系数电阻，该电阻选用 RT 型碳膜电阻，温度系数为 $-(6 \sim 20) \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。为了进一步克服温漂，采用了能隙基准电源 MC1403，保证了比较电压和传感器跟踪工作电压的低温漂特性，运放采用 LM725 低温漂特性运放。此外，采用高速光耦 6N137 不但实现了抗干扰，而且使单片机及时捕捉到下降沿，保证了跟踪的准确性。

3 车身高度跟踪系统的软件设计及滤波处理

硬件跟踪电路需要与软件程序配合才能完成车身高度的跟踪。在 ECAS 客车行驶过程中，车身高度信号受到路面激励与车速干扰的影响，成为不断变化的随机信号。因此在软件设计中需要对跟踪的数据进行有效的处理，从而得到车辆行驶过程中准确的动态车身高度。

系统单片机采用 MC9S08GB60, 时钟周期为 0.18 μs。对车身高度的跟踪采用中断方式, 车身高高度信号跟踪的总体流程如图 3 所示。在初始化程序中已将定时器 1 的通道 1 至通道 3 设置成下降沿捕捉中断, 对应悬架的前桥和后桥的总共三个高度传感器。对车身高度的跟踪是始终进行的, 以前桥高度跟踪为例, 结合高度跟踪电路图(图 2), 在 CONTROL 端输入一个低电平, 并启动定时器 1 通道 1 的定时捕捉功能(定时器 1 通道 1 端口连接电路的 OUTPUT 端), 当跟踪到下降沿, 通道 1 停止计时, 并进入中断服务子程序, 在子程序中读取通道 1 的定时值, 该值表征了该时刻的车身高度, 并在该子程序中设置前桥高度跟踪完成标志 FB_DetectComplete = 1, 这样在主程序执行到高度信号跟踪与处理子程序时, 就可以对该数据进行进一步处理。

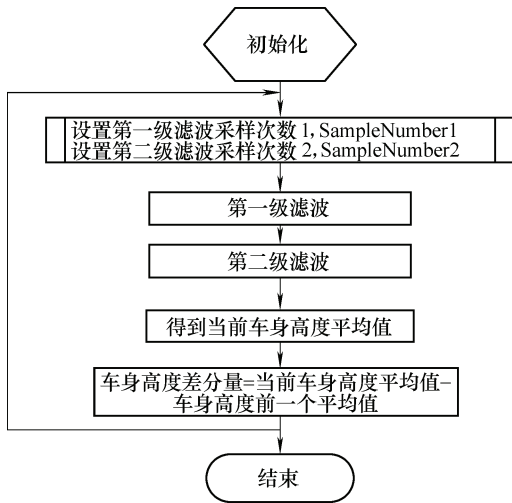


图 3 高度数据处理总体框架

为了节省软件计算时间, 保证实时性, 车身高高度跟踪数据采集后, 采用需时少的相关滤波处理。第一级滤波的程序流程如图 4 所示, 当变量 FB_DetectComplete=1 时, 表明前桥高度跟踪完成, 进入高度信号跟踪与处理子程序。FB_Data 为跟踪到的高度数据, 如该数据可用(即 FB_Data 不为零), 进入下一步处理, 判断该值的大小。因为异常情况(如车辆通过减速带等)会造成对跟踪值的影响, 所以设置了跟踪值的有效范围(上一次高度信号处理结果减去某一常数值作为下限值, 上一次高度信号处理结果加上某一常数值作为上限值), 该常数值可根据实际高度换算得到, 本系统设置的常数值为 10 mm 左右, 因此前后两次的跟踪值之差不可能大于 10 mm, 这样就保证了车身高高度跟踪值的正确性。

车身高高度数据滤波处理过程中, 对跟踪到的数据进行限定后, 需要标记出跟踪到的最大值和最小

值, 并在数据求和时, 减去最大值和最小值, 所以一级滤波的结果为跟踪到的高度数据累加和减去最大值和最小值后, 求平均值。二级滤波的结果与一级滤波的结果相似, 程序流程如图 5 所示。

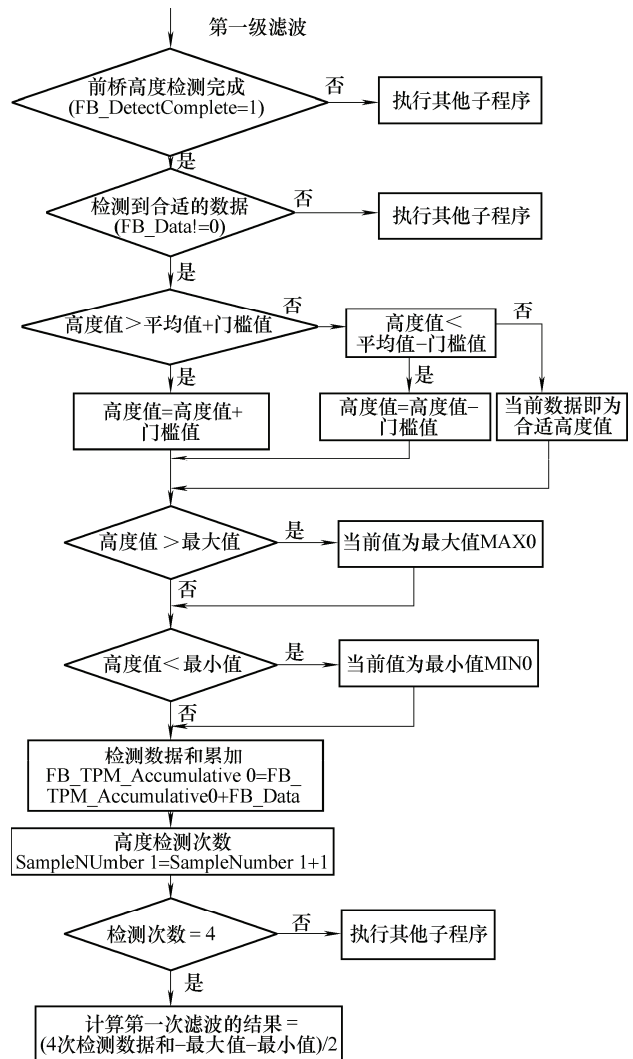


图 4 第一级滤波程序流程图

高度传感器中电感最大时的时间常数为 300 μs, 且由于设计的滤波软件用时较少, 经过两级滤波处理后, 车身高高度跟踪周期小于 0.2 s, 而空气悬架的固有频率在 1.5 Hz 以下, 完全能够满足高度跟踪的实时性要求。

4 试验

开发的电子控制空气悬架客车采用三点高度跟踪(分别为前悬 1 点、后悬左右各 1 点), 按照 ECAS 系统设计的要求, 搭建车身高高度跟踪系统的试验台并进行相关测试。

在课题研究的初期, 通过构建 LC 振荡电路, 由单片机检测不同电感系数下的振荡频率, 间接地

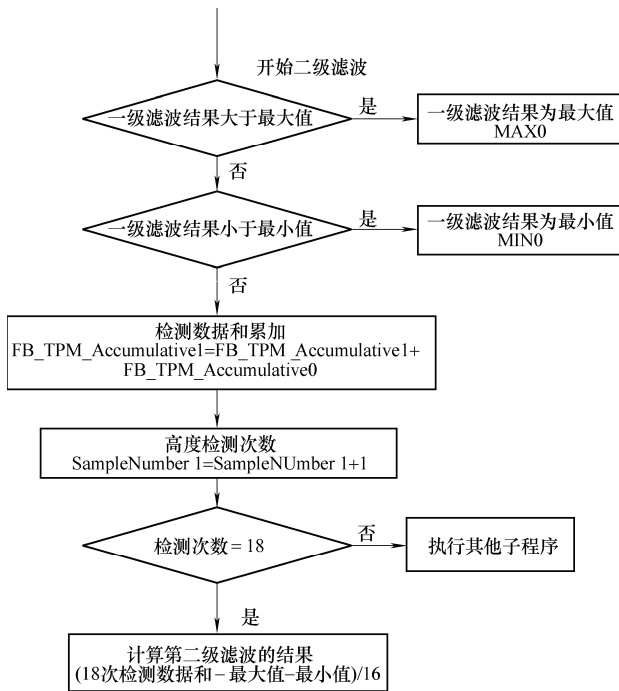


图 5 第二级滤波程序流程图

获得车身高度的变化,但试验表明原跟踪系统稳定度差、重复性低、抗外界干扰能力弱,图 6 为测频法高度跟踪系统的 ECU 输出值,可以发现车身高跟踪系统初始稳定时间比较长(大约 2 min 左右),而且稳定后 ECU 输出值的波动很大(大约 $10 \mu\text{s}$ 左右)。图 7 所示为改进后车身高跟踪系统的 ECU 输出值,三个高度测点值波动均在 $1 \mu\text{s}$ 以下,根据传感器输出特性,摆杆每旋转 1° ,传感器数值对应的变化为 $4 \mu\text{s}$,对于确定摆杆长度 233 mm 情况,可以换算车身高变化 1 mm,传感器数值变化为 $1 \mu\text{s}$,由试验结果可以发现车身高跟踪变化值在 1 mm 以内,其跟踪精度较高,稳定性也佳,完全满足车身高控制的要求。

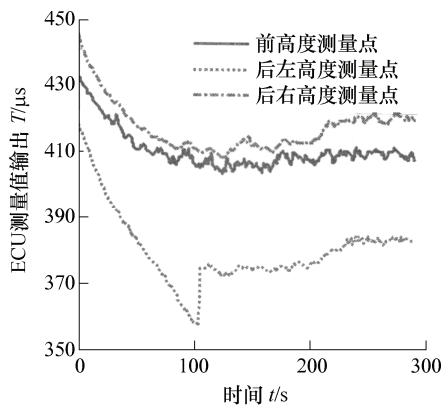


图 6 高度传感器摆杆不动时测频法高度跟踪系统的 ECU 输出值

为了测试设计的跟踪电路对环境温度变化的敏感性,试验时通过加热的方法改变跟踪系统的周

遭温度,并测试温度稳定后系统的跟踪值。图 8 为在不同环境温度下,后左测点车身高跟踪检测的 ECU 输出值,表明环境温度从 30°C 变化到 80°C ,车身高跟踪值仅变化了 5 mm,满足车身高跟踪的精度要求。若要更精确的车身高跟踪,可以在硬件中增加温度传感器对高度跟踪值进行必要的修正,以满足更高的车身高控制要求。

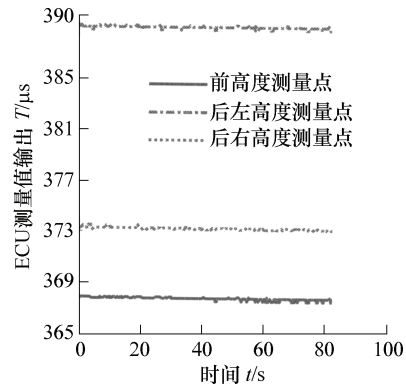


图 7 高度传感器摆杆不动时车身高跟踪系统(改进后)的 ECU 输出值

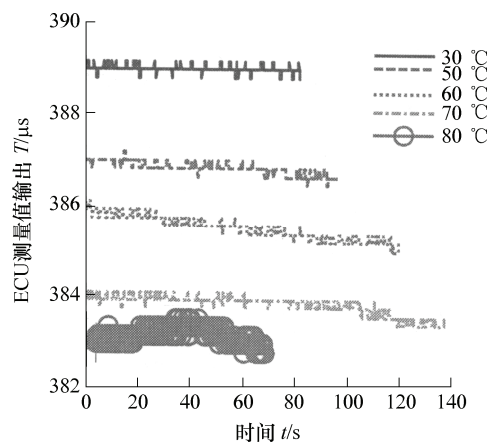


图 8 不同环境温度下某测点高度跟踪系统的 ECU 输出值

5 结论

(1) 根据客车实际运行工况的要求,设计了一种软硬件结合的车身高跟踪系统,能够准确、实时地跟踪车身高度的变化。

(2) 跟踪电路采用能隙基准电压器件、选用温漂小的运放及采用温度补偿环节,适应了环境温度的变化,提高了车身高跟踪的准确性。

(3) 设计了专用的滤波软件,既保证了车身高动态高度的准确跟踪,又满足跟踪的实时性。该跟踪系统稳定性好、抗干扰能力强,能够满足客车全自动电控空气悬架的控制要求。在完成浙江省重大科技专项重点项目“电子控制空气悬架的开发应用

(2006C11089)”中,该技术已成功用到 YBL6891H 型客车改装空气悬架的电子控制系统中。

参 考 文 献

- [1] BURTON A W, TRUSCOTT A J, WELLSTEAD P E. Analysis, modelling and control of an advanced automotive self-levelling suspension system [J]. IEE Proc.-Control Theory Appl. 1995, 142(2): 129-139.
- [2] MALIN P. Derivation of air spring model parameters for train simulation [D]. Sweden: Lulea University of Technology, 2002.
- [3] 喻凡, 黄宏成, 管西强. 汽车空气悬架的现状与发展趋势[J]. 汽车技术, 2001(8): 6-10.
YU Fan, HUANG Hongcheng, GUAN Xiqiang. Present status and developing trend of automotive air suspension [J]. Automobile of Technology, 2001(8): 6-10.
- [4] 汪卫东. 汽车空气悬架的发展及我国研发对策思考[J]. 客车技术与研究, 2005(5): 1-3.
WANG Weidong. Development and strategy of domestic automobile air-ride suspension [J]. Bus Technology and Research, 2005(5): 1-3.
- [5] 黄俊明, 周孔亢, 徐兴, 等. 电子控制空气悬架高度调节过程非线性模型[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6): 278-283.
HUANG Junming, ZHOU Kongkang, XU Xing, et al. Nonlinear model on leveling procedure of electronically controlled air suspension [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6): 278-283.
- [6] SHUUICHI B, TOSHIO O, KAORU O, et al. Compiler: US, 4714271[P/OL]. 1987-11-22. <http://www.google.com/patents/about?id=OZU8AAAAEBAJ&dq=4714271>.
- [7] 宋福昌. 汽车传感器识别与检测图解[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
SONG Fuchang. Automotive sensor identification and detection of graphic [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [8] YUTAKA H, KATSUYOSHI K. Compiler: US, 4978848 [P/OL]. 1990-12-18. <http://www.google.com/patents/about?id=D-cZAAAAEBAJ&dq=4978848>.
- [9] 杨林, 陈思忠, 吴志成, 等. 大客车空气悬架电子高度控制系统设计[J]. 北京汽车, 2007(2): 4-7.
YANG Lin, CHEN Sizhong, WU Zhicheng, et al. Design of leveling controlled air suspension for bus [J]. Beijing Automobile, 2007(2): 4-7.
- [10] WABCO. Electronically controlled air suspension (ECAS) for air-sprung buses[R]. Germany: A Division of WABCO Standard GmbH, 1997.

作者简介: 徐兴(通信作者), 男, 1979年出生, 博士研究生。主要研究方向为空气悬架动力学及其控制系统。

E-mail: xuxing@ujs.edu.cn

陈照章, 男, 1945年出生, 教授、博士研究生导师。主要研究方向为电力电子技术、信号检测及控制等电子技术应用。

E-mail: czz@ujs.edu.cn