

文章编号:1008-1542(2015)06-0566-07

doi:10.7535/hbkd.2015yx06003

## 基于倾角传感器的坡道角度识别研究

谷文豪<sup>1</sup>,王洪亮<sup>1</sup>,皮大伟<sup>1</sup>,石秉良<sup>2</sup>,李楠<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094; 2. 中国人民解放军总装备部汽车试验场, 江苏南京 210028)

**摘要:**针对坡道角度识别问题,探究汽车车身倾角传感器信号与坡道角度的关系。分析了汽车在坡道上的受力,并对车身倾角与前、后悬架伸缩量的关系进行探讨。根据悬架与轮胎变形量推导出坡道误差角。运用 Matlab/Simulink 建立数学模型并进行仿真,生成坡道误差角曲线。结果表明:坡道误差角随着坡道角度增加而增大,限值可达 6.5%,本文的识别方法可有效消除这一误差,提高坡道角度识别的精确度。

**关键词:**车辆工程;车身倾角;坡道误差角;悬架;坡道传感器

**中图分类号:**U463.54      **文献标志码:**A

## Research on recognition of ramp angle based on transducer

GU Wenhao<sup>1</sup>, WANG Hongliang<sup>1</sup>, PI Dawei<sup>1</sup>, SHI Bingliang<sup>2</sup>, LI Nan<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu, 210094, China; 2. Virtual Proving Ground, PLA General Armament Department, Nanjing, Jiangsu 210028, China)

**Abstract:** Focusing on the recognition of ramp angle, the relationship between the signal of vehicle transducer and real ramp angle is studied. The force change of vehicle on the ramp, and the relationship between the body tilt angle and front and rear suspension scale is discussed. According to the suspension and tire deformation, error angle of the ramp angle is deduced. A mathematical model is established with Matlab/Simulink and used for simulation to generate error curve of ramp angle. The results show that the error angle increases with the increasing of the ramp angle, and the limit value can reach 6.5%, while the identification method can effectively eliminate this error, and enhance the accuracy of ramp angle recognition.

**Keywords:** automotive engineering; body tilt angle; error angle of ramp angle; suspension; ramp sensor

坡道起步作为较复杂的驾驶操作,驾驶员需要将离合器、制动器、油门进行协同控制,在坡道、负载变化不同的情况下,其半联动位置都不尽相同。

针对坡道起步采取有效的方法是加装坡道辅助系统(hill-start assist system, HAS)。HAS 具有主动控制功能,可有效避免车辆坡道起步时后溜。通过控制位于制动主缸和轮缸之间的隔离阀通断,保持轮缸的压力,给驾驶员足够的时间用来换挡和踩下油门踏板<sup>[1]</sup>。其控制的难点是判断出解除制动力的时间点,而这需

收稿日期:2015-07-06;修回日期:2015-08-20;责任编辑:冯 民

基金项目:国家自然科学基金(51205209,51205204);中国博士后科学基金(2013M531360)

作者简介:谷文豪(1991—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,主要从事汽车电子方面的研究。

通讯作者:王洪亮副教授。E-mail: whl343@163.com

谷文豪,王洪亮,皮大伟,等.基于倾角传感器的坡道角度识别研究[J].河北科技大学学报,2015,36(6):566-572.

GU Wenhao, WANG Hongliang, PI Dawei, et al. Research on recognition of ramp angle based on transducer[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(6): 566-572.

要对起步阻力进行准确辨识。

坡道阻力辨识的方法不尽相同,部分采用了基于纵向动力学的坡道识别方法<sup>[1-2]</sup>。该方法基于纵向动力学通过对道路阻力矩进行实时跟踪计算,前一次的道路阻力矩就当作下次起步时的道路起步阻力矩。文献[3]采用了坡道角度传感器直接测量坡道角度。文献[4]—文献[5]设计了一种扭矩传感器,通过测得制动支撑架受力来反映出当前坡道阻力。文献[6]运用一种改进型最小二乘法对整车质量与广义坡度进行实时辨识。文献[7]—文献[8]提出采用单摆式传感器、车身纵向加速度传感器和车身后部上下位移传感器的动态测量信号并通过信息融合来实现动态识别道路坡度角的方法。文献[9]基于电驱动车辆的输出转矩,通过分析纵向动力学模型,用递归最小二乘法建立了质量估计算法,然后利用动力学方法和运动学方法对路面坡度进行了融合观测。通过分析汽车在坡道上的受力,建立了质心位置、前后轴荷和悬架刚度的动力学关系。针对影响坡道阻力识别因素之间的关系,提出调整策略,修正求取坡道阻力公式。

坡道阻力识别的关键点在于对坡道角度的识别,本文利用基于倾角传感器直接识别坡道角度的方法进行分析研究。首先,简化汽车停驻在坡道上的受力示意图,分析出坡道阻力公式;其次,介绍汽车倾角传感器工作原理以及其安放位置,由此引出由倾角传感器直接测得坡道角度方法的缺陷;最后,分析影响传感器识别精度的因素,提出修正坡道角度识别计算公式,并进行仿真计算。

### 1 倾角传感器

汽车在坡道起步过程中将受到滚动阻力、驱动阻力、坡道阻力、加速阻力及制动力的作用,在从静态到动态的起步过程中,首先要克服坡道阻力  $F_i$ , 见式(1)。

$$F_i = G \sin \alpha, \tag{1}$$

式中  $\alpha$  为坡道角度, ( $^\circ$ )。

根据式(1)可以看出,求取坡道阻力的关键在于坡道角度的准确性。

被用来测量坡道角度的倾角传感器已广泛地应用于汽车电控系统中。某电子驻车制动系统采用的倾角传感器如图 1 所示<sup>[10]</sup>。其性能参数见表 1。

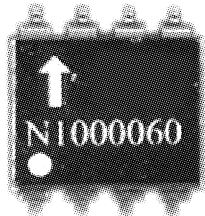


图 1 某型电子倾角传感器

Fig. 1 Angle sensor physical figure

表 1 某型电子倾角传感器性能参数

Tab. 1 Angle sensor performance parameters

供电电压/V	5
输出电压/V	0.5~4.5
测量范围/ $^\circ$	-90~+90
工作温度范围/ $^\circ\text{C}$	-40~+125

该传感器是一种典型的差动电容式加速度传感器,由敏感元件、电容检测电路以及放大/滤波电路组成。其敏感元件为一个基于 MEMS 技术的差动变极距式电容器件,结构如图 2 所示。敏感元件的中间为动极板,上下两块板为定极板,每个极板都有一个引线端子。动极板分别与上下定极板组成 2 个电容  $C_1, C_2$ 。上下定极板固定不动。当动极板受到一个方向与之垂直的加速度时,动极板与上下定极板的距离  $d_1, d_2$  将朝着相反的方向变化,即电容  $C_1, C_2$  的极距发生改变,从而 2 个电容的大小也随着  $d_1, d_2$  的变化而变化。电容检测电路检测出 2 个电容的差值变化,然后通过放大/滤波电路后以电信号的形式输出<sup>[11]</sup>。如果初速度已知,就可以通过积分计算出线速度,进而可以计算出直线位移。

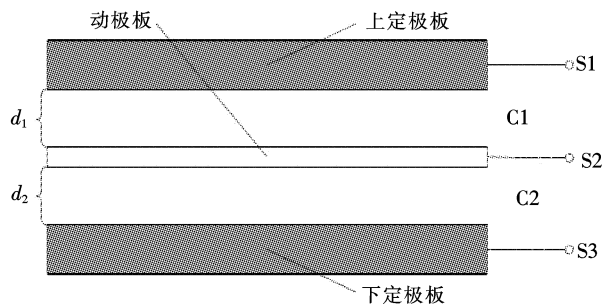


图 2 传感器敏感元件结构示意图

Fig. 2 Sensor sensitive element structure diagram

该倾角传感器只在如图3所示轴向上具备测量角度的能力。

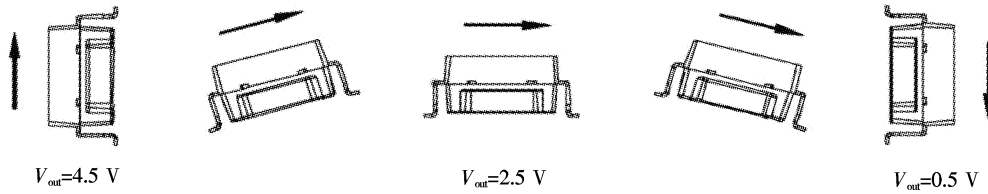


图3 倾角传感器的角度测量  
Fig. 3 Angle sensor measurements

该倾角传感器的倾角计算方法见式(2)。

$$\theta = \arcsin\left(\frac{V_{out} - V_{offset}}{Sensitivity}\right), \quad (2)$$

式中： $\theta$ 为倾角传感器测得的角度，(°)； $V_{out}$ 为传感器的输出电压值，V； $V_{offset}$ 为芯片在0°即水平放置时的输出电压值， $V_{offset} = 2.5$  V；Sensitivity为芯片的灵敏度。

因 $V_{out}$ 是标准的0~5 V范围内的电压信号，而MCU内已集成A/D转换功能且满足测量范围，所以只需将连接到MCU的模数转换引脚，进行电压值采样即可。设计倾角传感器电路原理如图4所示。

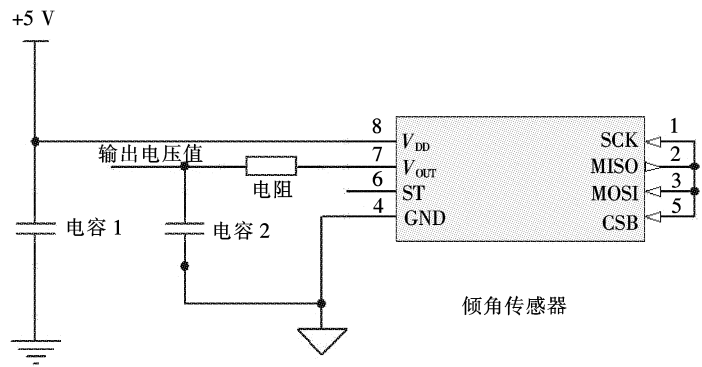


图4 倾角传感器电路原理图  
Fig. 4 Angle sensor circuit principle diagram

将传感器置于ECU中，并把ECU安装在车身上，使传感器与车身有相同的倾角，即传感器的角度就是车身的角度<sup>[12]</sup>，可谓车身倾角传感器。而汽车驻车在坡道上时，会因为悬架刚度，轮胎刚度引起车身倾斜角，从而造成坡道角度误差。

## 2 车身姿态与路面的关系

### 2.1 平路上的车身姿态

汽车静止或匀速行驶在平路上时，其静态模型可简化为如图5。

图5中， $F_{z1}$ ， $F_{z2}$ 为作用在前、后轮上的地面法向反作用力，N； $h_g$ 为汽车质心高，m； $L$ 为汽车轴距，m； $a$ ， $b$ 为汽车质心至前轴、后轴之距离，m； $S_1$ ， $S_2$ 为前后悬架长度，m。

根据图5中各力可求得 $F_{z1}$ ， $F_{z2}$ ，见式(3)。

$$\begin{cases} F_{z1} = G \frac{b}{L}, \\ F_{z2} = G \frac{a}{L}. \end{cases} \quad (3)$$

忽略轮胎和弹簧的质量、弹簧原长，假设悬架上方的力是作用在轮胎上的地面法向反作用力 $F_z$ ，且悬架的变形呈线性变化，可得悬架在坡道上变形量：

$$\begin{cases} S_1^0 = \frac{Gb}{LK_1}, \\ S_2^0 = \frac{Ga}{LK_2}. \end{cases} \quad (4)$$

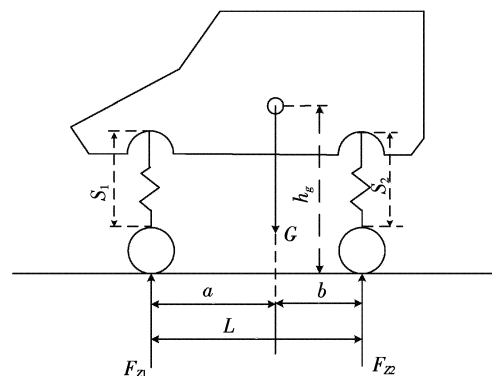


图5 汽车在平路上静态分析简化示意图  
Fig. 5 Simplified schematic diagram of static analysis of a car on flat road

式中: $S_1^0, S_2^0$  为前后悬架在平地上的长度, m;  $K_1, K_2$  为前、后悬架刚度, N/m。

## 2.2 坡道上的车身姿态

当汽车停驻在坡道上时,前、后悬架会发生一定的伸缩。然而在多数情况下,汽车即使停驻在平路上,前、后悬架伸缩量也不同,致使车身带有一定的倾斜角度,此时需校准倾角传感器在平路上为零,汽车上坡静态分析简化如图6所示。

图6中 $\beta$ 为因悬架刚度引起的坡道误差角度, ( $^\circ$ ), 在文中用坡道误差角表示。

$$\begin{cases} F_{z1} = G \cos \alpha \frac{b}{L} - G \sin \alpha \frac{h_g}{L}, \\ F_{z2} = G \cos \alpha \frac{a}{L} + G \sin \alpha \frac{h_g}{L}. \end{cases} \quad (5)$$

忽略轮胎和弹簧的质量、弹簧原长,假设悬架上方的力是作用在轮胎上的地面法向反作用力 $F_z$ ,且悬架的变形呈线性变化,可得悬架在坡道上变形量:

$$\begin{cases} S_1 = (G \cos \alpha \frac{b}{L} - G \sin \alpha \frac{h_g}{L}) / K_1, \\ S_2 = (G \cos \alpha \frac{a}{L} + G \sin \alpha \frac{h_g}{L}) / K_2. \end{cases} \quad (6)$$

结合式(3)一式(6),可以进一步推导出在上坡时基于悬架伸缩量变化的坡道误差角度,即:

$$\beta = \arctan[(S_1 - S_1^0) + (S_2^0 - S_2)] / L, \quad (7)$$

$$\alpha = \theta - \beta. \quad (8)$$

则在预判向上坡道阻力 $F_i$ 大小时,需要将传感器测得的角度减去误差角度,即:

$$F_i = G \sin \alpha = G \sin(\theta - \beta). \quad (9)$$

在上述分析基础上,可以再考虑轮胎刚度引起的前、后车身伸缩量,即:

$$\begin{cases} S_1 = (G \cos \alpha \frac{b}{L} - G \sin \alpha \frac{h_g}{L}) / K_1 + \frac{(M + m_1) g \cos \alpha}{2C}, \\ S_2 = (G \cos \alpha \frac{a}{L} + G \sin \alpha \frac{h_g}{L}) / K_2 + \frac{(M + m_2) g \cos \alpha}{2C}. \end{cases} \quad (10)$$

式中: $M$ 为汽车车身质量, kg;  $m_1$ 为左/右前悬架非簧载质量, kg;  $m_2$ 为左/右后悬架非簧载质量, kg;  $C$ 为轮胎刚度, N/m;  $S_1, S_2$ 分别为前、后悬架伸缩量与轮胎伸缩量变化之和, m。求导出 $S_1, S_2$ 后,即可求得修正后的坡道阻力 $F_i$ 。

在实际驾驶中,汽车不仅会停驻在向上坡道上,还会停驻在向下坡道上。汽车在下坡上启动时,驾驶员挂入倒档后,控制离合器和油门踏板来调整驱动力大小,在此过程中如果离合器控制不当也会造成车辆剧烈抖动或者熄火现象。所以在未来的坡道起步辅助系统设计中不应局限于上坡情况,还应考虑下坡情况。在前文讨论基础上,分析了汽车停驻在向下坡道上时因悬架、轮胎刚度引起的坡道角度识别误差。参考式(3)一式(10),可计算出前、后车身伸缩量,即:

$$\begin{cases} S_1 = (G \cos \alpha \frac{b}{L} + G \sin \alpha \frac{h_g}{L}) / K_1 + \frac{(M + m_1) g \cos \alpha}{2C}, \\ S_2 = (G \cos \alpha \frac{a}{L} - G \sin \alpha \frac{h_g}{L}) / K_2 + \frac{(M + m_2) g \cos \alpha}{2C}. \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可以看出,在下坡时汽车的悬架和轮胎的伸缩量与上坡时的差异在于 $F_{z1}, F_{z2}$ 的不同,按照本文求导坡道误差角度的思路,可以求得在下坡时坡道识别误差角度,即:

$$\beta = \arctan[(S_1^0 - S_1) + (S_2 - S_2^0)] / L. \quad (12)$$

式(12)较之式(7)不同之处在于,坡道上前、后悬架伸缩量 $S_1, S_2$ 与平地上前、后悬架伸缩量 $S_1^0, S_2^0$ 的和

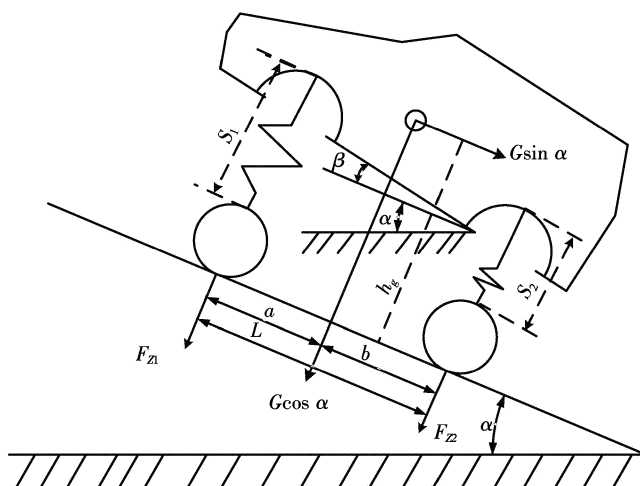


图6 停驻在向上坡道上的汽车静态分析图

Fig. 6 Static analysis of a car on up-ramp

差方式,从而在 Matlab/Simulink 中搭建的数学模型呈现的曲线为负比例关系。

### 3 坡道角度识别仿真分析

运用 Matlab/Simulink 建立坡道识别系统数学模型进行仿真验证,并输入整车参数,选用某试验车参数见表 2。

在 Simulink 中搭建数学模型,使得在 Matlab 的主界面下也可查看和修改其中的参数值。在 Simulink 中运行模型,即可完成对模型的仿真计算。按照系统各状态方程,汽车停驻在上坡道时坡道角度识别数学模型在 Matlab/Simulink 界面中的构建见图 7。

表 2 某试验车参数

Tab.2 A test car parameters

参数	数值
轴距/m	3.31
质心距前轴距离/m	2.03
质心距后轴距离/m	1.28
满载的车身质量/kg	5 859
左/右前悬架非簧载质量/kg	105.5
左/右后悬架非簧载质量/kg	215
前悬架刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	166 350
后悬架刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	297 140
轮胎刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	470 000

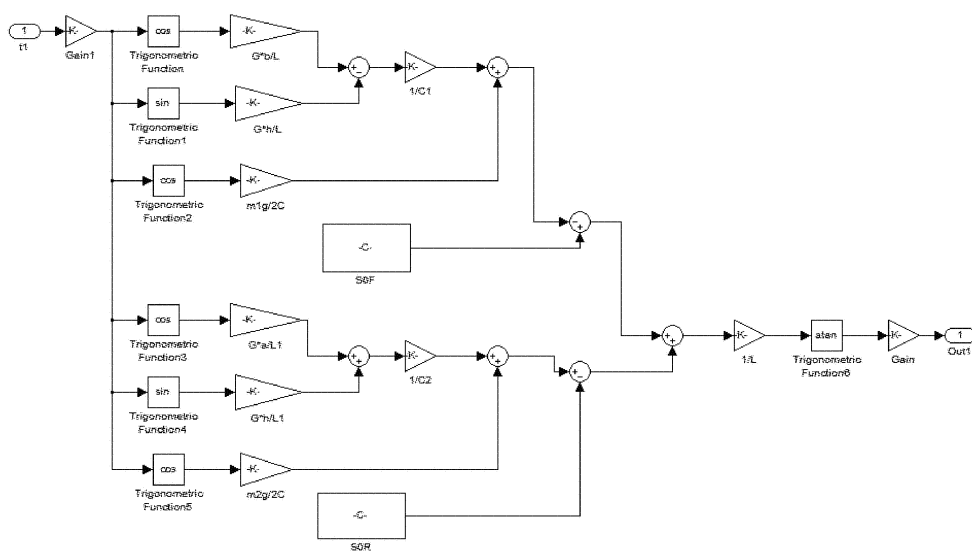


图 7 坡道角度识别数学模型

Fig.7 Ramp angle recognition mathematical model

由于所采用的试验车为越野车,通常越野车的最大爬坡度可达 60%(即 31°左右),所以给系统输入一个 0~30°的坡道角度,输出在上、下坡道上的坡道识别误差角度  $\beta$ ,并令车身沿着坡道向上的夹角为正,见图 8。

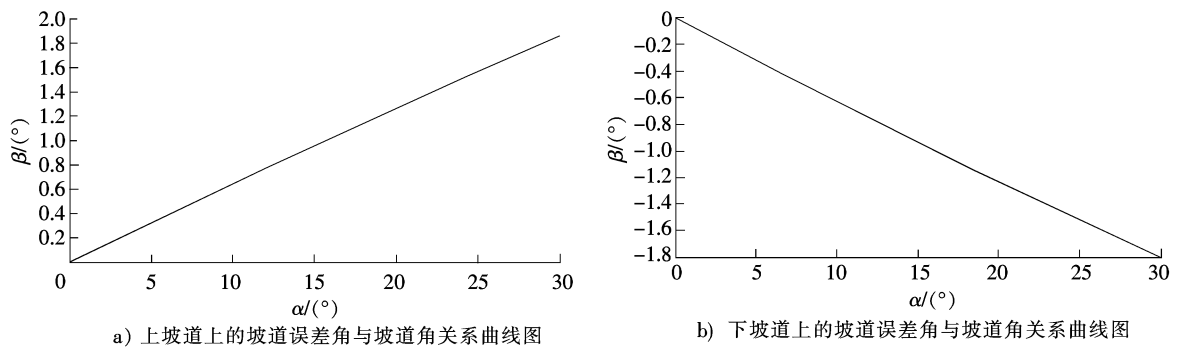


图 8 坡道误差角与坡道角关系曲线图

Fig.8 Relation graph of ramp angle recognition error and the real plot of the ramp angle

在图 8 的基础上,可以进一步求出角度误差率:

$$\xi = \frac{\theta - \alpha}{\alpha} = \frac{\beta}{\alpha}, \quad (13)$$

式中  $\xi$  为角度误差率。

经过分析图 8 所示数据得知,受悬架刚度的影响,当坡度越大时,传感器测得的角度越接近坡道角度。在上坡时,传感器测得的坡道角度与真实的坡道角度误差为 5.6%~6.5%;在下坡时,坡道角度误差为 5.4%~6.5%。

根据前文推论,可采用 Matlab/Simulink 拟合出传感器测得的角度  $\theta$  与坡道角  $\alpha$  之间的关系,见图 9。

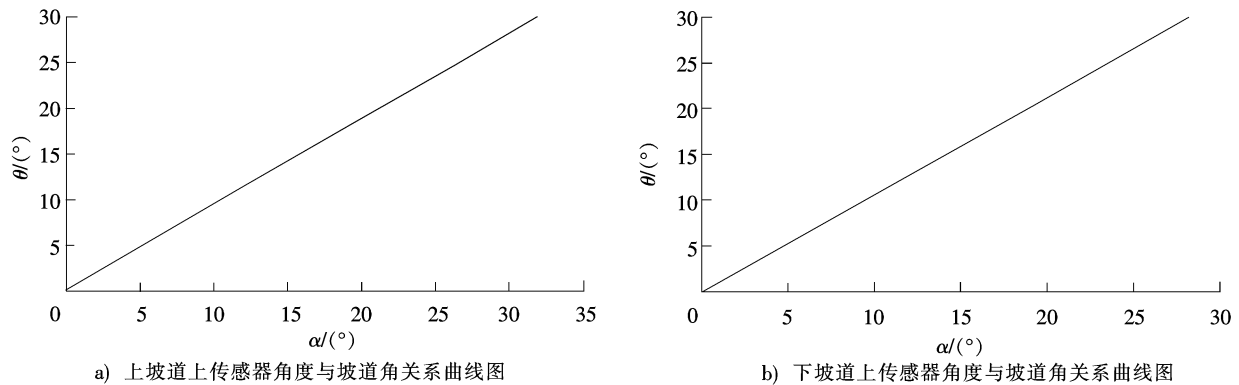


图 9 传感器角度与坡道角关系曲线图

Fig.9 Relation graph of sensor angle and ramp angle

由图 9 可以看出,传感器测得角度  $\theta$  与坡道角度  $\alpha$  近似于线性关系,见式(14):

$$\alpha = \epsilon \theta, \quad (14)$$

式中  $\epsilon$  为系数,在上坡道时为 0.9,在下坡道时为 1.1。

## 4 结 语

基于某单轴型倾角传感器研究了坡道角度识别问题,在分析影响坡道阻力识别精度的相关因素的基础上,提出了相应的修改坡道角度识别的计算方法。建立了坡道角度识别的数学模型,并利用 Matlab/Simulink 进行仿真验证,证明通过分析悬架刚度、轮胎刚度的伸缩量,可以对原有坡道角度识别公式进行修正,从而消除这 2 个因素造成的误差,改善坡道起步阻力识别精度。

## 参考文献/References:

- [1] 葛敏林. AMT的坡道起步辅助系统自动控制的研究[D]. 长春:吉林大学, 2008.  
GE Minlin. Study on the Automatic Control of Hill-start Assist System for AMT System[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [2] 葛安林,雷雨龙,高义峰,等. 电控机械式自动变速器车辆坡上起步控制研究[J]. 汽车工程, 1998, 20(3): 150-155.  
GE Anlin, LEI Yulong, GAO Yifeng, et al. A research on hill starting control of AMT system of vehicle[J]. Automotive Engineering, 1998, 20(3): 150-155.
- [3] 王洪亮,苑庆泽,钟焕祥,等. 基于 EPB 的汽车坡道起步自动控制技术[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(4): 344-348.  
WANG Hongliang, YUAN Qingze, ZHONG Huanxiang, et al. Research on the hill-start auto control for the vehicles with EPB[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(4): 344-348.
- [4] 林俊山,王吉忠,沙德文,等. 基于集成扭矩传感器的电动驻车制动器坡道起步控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(sup): 745-747.  
LIN Junshan, WANG Jizhong, SHA Dewen, et al. The hill-start control method of electric park brake based on integrate torque sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(sup): 745-747.
- [5] 崔海峰,刘昭度,王国业,等. 基于扭矩传感器的汽车坡道起步辅助系统[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(10): 1191-1193.  
CUI Haifeng, LIU Zhaodu, WANG Guoye, et al. Hill-start assist control system based on torque sensor for car[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(10): 1191-1193.

- [6] 史俊武,鲁统利,李小伟,等. 自动变速车辆坡道行驶自适应换挡策略[J]. 农业机械学报, 2011,42(4):1-7.  
SHI Junwu,LU Tongli,LI Xiaowei,et al. Self-adaptive slope gearshift strategy for automatic transmission vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural,2011,42(4): 1-7.
- [7] 杨志刚,曹长修,苏玉刚. 道路坡度识别方法的技术实现[J]. 重庆交通学院学报,2002,21(3):112-115.  
YANG Zhigang,CAO Changxiu,SU Yugang. The practical techniques of identifying road grade[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2002,21(3): 112-115.
- [8] 杨志刚,曹长修,苏玉刚. 动态识别道路坡度的多传感器信息融合方法[J]. 重庆交通学院学报, 2002,21(2): 97-102.  
YANG Zhigang,CAO Changxiu,SU Yugang. The method of identifying dynamically road grade by means of multi-sensor information fusion[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University,2002,21(2): 97-102.
- [9] 褚文博,罗禹贡,罗剑,等. 电驱车辆的整车质量与路面坡度估计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014,54(6): 724-728.  
CHU Wenbo,LUO Yugong,LUO Jian, et al. Vehicle mass and road slope estimates for electric vehicles [J]. J Tsinghua Univ (Sci& Technol),2014,54(6):724-728.
- [10] 于钦. 气压式电子驻车制动系统设计研究[D]. 南京:南京理工大学, 2015.  
YU Qin. Design and Research on the Pneumatic Parking Brake System[D]. Nanjing:Nanjing University of Science & Technology,2015.
- [11] 张纯. 加速度传感器自动标定系统的研究与实现[D]. 长沙:湖南大学,2012.  
ZHANG Chun. The Research and Realization of Accelerometer Automatic Calibration System[D]. Changsha:Hunan University,2012.
- [12] 严进辉. 电控机械式自动变速器坡道起步控制研究[D]. 长春:吉林大学, 2009.  
YAN Jinhui. Study on the Control of Hill-starting for AMT[D]. Changchun:Jinlin University,2009.
- [13] BAE H S,RYU J,GERDES J C. Road grade and vehicle parameter estimation for longitudinal control using GPS[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Oakland:[s. n. ],2001.
- [14] SAHLHOLM P, HENRIK J K. Road grade estimation for look-ahead vehicle control using multiple measurement runs[J]. Control Engineering Practice,2010, 18(11): 1328-1341.
- [15] LEE C W, CHUNG H B, LEE Y O, et al. Fault detection method for electric parking brake (EPB) systems with sensorless estimation using current ripples[J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(3):387-394.
- [16] SLOSARCZYK K, LINDEN J G, BURNNHAM K J, et al. Implementation of an electronic park brake feature with limited data availability[C]// Systems Engineering,19th International Conference on. [S. l. ]: IEEE, 2008:254-259.
- [17] LEE Y O, SON Y S, CHUNG C C. Clamping force control for an electric parking brake system: Switched system approach[J]. Vehicular Technology IEEE Transactions on, 2013, 62(7):2937-2948.
- [18] JANG M, LEE Y O, LEE W, et al. Novel clamping force control for electric parking brake systems[C]// Asian Control Conference. [S. l. ]:IEEE, 2009:1588-1593.
- [19] DELVECCHIO D, SERGIO M. SAVARESI C S, et al. A control system for hill start assistance for commercial vehicles[C]// ASME 2009 Dynamic Systems and Control Conference. [S. l. ]:[s. n. ],2009:517-524.
- [20] CORPORATION H P. Slide mode control for integrated electric parking brake system[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 11(4):1311-1311.
- [21] 王洪亮,董巍,李楠,等. 中/重型汽车电子驻车系统设计及控制研究[J]. 河北科技大学学报, 2015,36(2):118-125.  
WANG Hongliang,DONG Wei,LI Nan,et al. Design and research on the electronic parking brake system of the medium and heavy duty vehicles[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology,2015,36(2):118-125.