

基于电磁信号导航的智能车系统设计与开发

潘明, 汪镭, 康琦, 吴启迪

(同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 运用嵌入式系统的开发方法, 详细描述了一套基于电磁导航原理设计的智能车系统开发过程。系统设计目标是: 在保证智能车不脱离运行轨道的前提下, 速度尽可能地快。系统选取 32 位微控制器 MK60DX256ZVLQ10 为主控芯片, 通过完整地设计并优化小车的硬件系统、软件系统和机械系统, 最终实现了智能车通过自行检测轨道导线激发的电磁波自主循迹行驶。

关键词: 控制理论与控制工程; 智能车; 电磁导航; 机械系统; 硬件系统; 软件系统

中图分类号: TP18

文献标志码: A

文章编号: 2095-2783(2014)04-0407-06

Design and development of smart car systems based on electromagnetic signals

Pan Ming, Wang Lei, Kang Qi, Wu Qidi

(Department of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: This paper introduces the developing process of a set of smart car systems based on the principle of electromagnetic navigation, using typical developing methods for embedded systems. The goal of system design is to make the smart car run as fast as possible along the track. In our design, we chose 32-bit MCU MK60DX256ZVLQ10 as the main controller. Finally, by designing and optimizing the hardware system, software system and mechanical system, we successfully made the smart car run automatically in the track by sensing the electromagnetic field around the guiding wire.

Key words: control theory and control engineering; smart car; electromagnetic navigation; mechanical system; hardware system; software system

对车辆的操作实质上可视为对一个多输入、多输出, 并且输入、输出关系复杂多变, 具有不确定多干扰源的复杂非线性系统的控制过程。驾驶员既要接受环境如道路、方向、行人等的信息, 还要感受汽车如车速、侧向偏移、横摆角速度等的信息, 然后经过判断、分析和决策, 并与自己的驾驶经验相比较, 确定应该做出的操纵动作。因此在整个驾驶过程中, 驾驶员的人为因素占了很大的比重。一旦出现驾驶员长时间驾车和疲劳驾车、判断失误的情况, 很容易造成交通事故^[1]。

当今的汽车产业, 电子技术的应用程度已成为汽车技术水平的重要标志之一, 这也促进了自动寻线智能车技术的不断发展^[2]。

智能车系统是一个集环境感知、规划决策和多个等级辅助驾驶等功能于一体的综合系统, 集中运用了计算机、现代传感、信息融合、通信、人工智能及自动控制等技术, 是典型的高新技术综合体。

通过对车辆智能化技术的研究和开发, 可以提高对车辆的控制与驾驶水平, 保障车辆行驶的安全、畅通和高效。对智能化的车辆控制系统的不断研究和完善, 相当于延伸扩展了驾驶员的控制、视觉和感官功能, 可极大地促进道路交通安全性。

近年来, 智能车辆已经成为世界车辆工程领域研究的热点和汽车工业增长的新动力, 很多发达国家都将其纳入到各自重点发展的智能交通系统当中。本文所谓的智能车系统是基于电磁导航原理设计, 其他比较常用的导航技术还有光电导航、摄像头导航等。相对于光电导航和摄像头导航技术, 电磁导航的最大优势在于不会受到白天、黑夜以及天气状况等因素的影响, 对外部环境条件的依赖性小。在电磁屏蔽系统的保护下, 电磁导航对外界因素的抗干扰能力也远远优于基于光线或影像的导航方式^[3]。

1 硬件系统设计

本文设计的智能车系统可分为硬件系统和软件系统两大部分。其中, 硬件系统是基础, 软件系统是核心。硬件系统又可分为机械设计部分和电路系统部分。各个部分相互协调、共同工作, 可实现总系统的功能。

1.1 硬件系统总体架构

1.1.1 机械设计部分

本文智能车在现成车模的基础上搭建而成。依据轨道的尺寸和特性, 选取东莞市博思数码科技公

收稿日期: 2014-02-24

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100072110038); 教育部新世纪人才计划项目(NECT-10-0633); 国家自然科学基金资助项目(70871091, 61075064, 61034004, 61005090); 上海市金融信息技术研究重点实验室开放课题

作者简介: 潘明(1988—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能自动化理论与工程

通信联系人: 汪镭, 教授, 主要研究方向为智能自动化理论与工程, wanglei_tj@126.com

司生产的长约 27.5 cm,宽约 16 cm,质量约 1.5 kg (含电池)的塑料车模作为智能车的主要车体,并在车模的合适位置组装并固定电机、舵机、编码器、传感器以及多个电路板等部件。必要时需对原车模的结构进行小幅的调整。最终成型的智能车车体如图 1 所示。

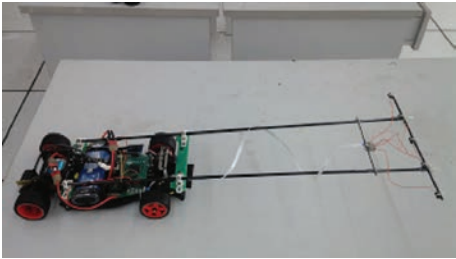


图 1 智能车整体结构图

1.1.2 电路系统部分

选取飞思卡尔公司生产的 32 位单片机 MK60DX256ZVLQ10 作为主控制器。智能车系统最重要的两个模块为转向控制模块和速度控制模块。转向控制模块首先由车体前方的电磁传感器采集轨道信息,之后主控制器对所采信息进行运算处理,求出控制输出,驱动执行机构(转向舵机)执行相应动作。速度控制模块则分别将编码器的反馈数据和转向控制器的输出结果作为输入量,共同作用于速度控制器,通过运算求得控制输出值,驱动速度控制模块的执行机构(电机驱动电路+电机)作出相应反应。

1.1.3 其他部分

除了机械和电路两大模块,其他硬件包括用于人机交互的 OLED 和键盘,以及用于数据外传的蓝牙模块和负责整个系统供电的电源管理模块等。智能车硬件系统的各组成部件如图 2 所示。

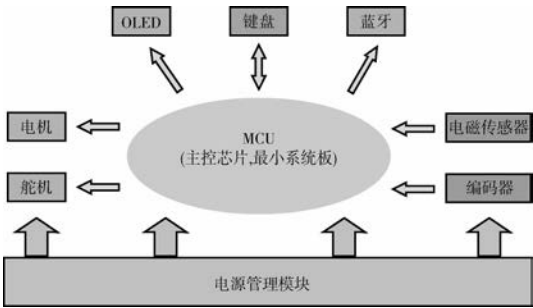


图 2 智能车硬件系统构成

1.2 硬件系统的各模块设计

1.2.1 单片机最小系统模块

MK60DX256ZVLQ10 以 Cortex-M4 架构为内核,资源丰富,内核频率可达 100 MHz,可以满足智能车系统的要求。芯片支持许多模块,电磁智能车系统组成如下:

1)ADC 模数转换模块。使用 ADC1 的 5 个通道

采集 5 路电磁传感器信号,并使用 1 路采集陀螺仪信号,精度配置为 16 bit。

2)PWM 波调制模块。系统分配一个 TIMER 产生 PWM 波,PWM 模块工作于互补输出模式,即两个 PWM 通道的相位是互补的,两个 PWM 通道形成互补输出。

3)正交编码模块。系统分配一个 TIMER 实现正交编码功能,正交编码模块可以直接测得 AB 相测速编码器的脉冲个数,且能十分精确地得知正转或反转信息。

4)GPIO 口。主要用于两个方面,即分别用 7 个 IO 口接受按键的输入,用 5 个 IO 口驱动 OLED 模块。

5)UART 通信模块。用一个 UART 异步通信模块与无线通信模块通信,实现与 PC 机的通信。

6)J-TAG 调试模块。用 20 脚的标准 J-TAG 调试接口,实现编译环境对单片机的烧写。

1.2.2 循迹传感器模块

轨道中心导线通有 100 mA、20 kHz 的交流电,需通过检测周围磁场的强弱来辨别轨道位置。本文最终选择工字电感+电容组成 LC 谐振电路的检测方法,并选用单电源运算放大器对信号进行放大和整流。传感器电路原理图如图 3 所示。

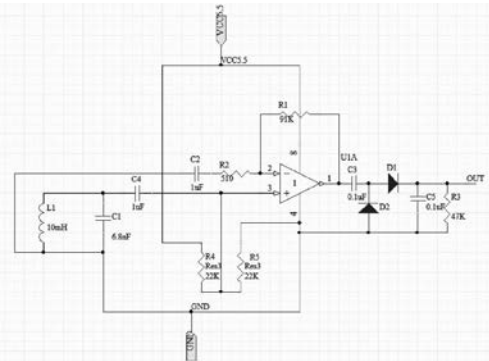


图 3 传感器放大整流电路原理图

1.2.3 电源管理模块

电源管理模块为整个电路提供稳定、高质量的电源,特别是对单片机的供电。本文的系统设计中,主控芯片、编码器、串口通信和电机驱动电路芯片都使用 5 V 供电;电磁传感器模块和 OLED 模块使用 3.3 V 供电。电池电压 7.8 V 左右,因此电源管理模块需要 5V、3.3V 两个稳压芯片。经过不断试验,5 V 稳压芯片选定 HT7550,该芯片是低压差的稳压芯片(LDO),稳压的精度高,SOT89 封装,体积小,能提供 250 mA 的电流,足够系统使用;3.3 V 稳压芯片选用 AMS1117,稳压精度高(1%的精度),SOT89 封装,体积小。

为防止电源电压被拉低引起单片机复位,采用二极管/电感和大电容的电路为单片机储存电能,电路原理如图 4 所示。

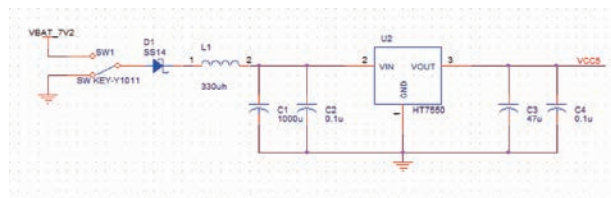


图4 电源管理模块电路原理图

1.2.4 电机驱动模块

电机驱动电路同样可有多种选择,比如专用的电机驱动芯片 MC33886、L298N 等。但是经过试验发现,使用以上芯片效果不好。原因是电感作为传感器前瞻比较小,在智能车高速运行并进入弯道时,需要用 H 桥的全桥电路驱动电机刹车才来得及制动。

搭建全桥电路的芯片和方法也有很多。本文最终选择两片英飞凌公司的半桥驱动芯片 BTS7970 组成全桥。其优点是外部电路简单,使用方便;缺点是内阻会比用 MOSFET 管搭建略大。试验表明,内阻的增加在可接受范围内。

1.2.5 测速模块

智能车系统中使用正交编码器测量小车即时速度并返回给主控芯片,作为控制策略的输入参数之一。正交编码器由光电码盘、发射器件和接收器件 3 个主要功能部件组成,通过接收频率判别速度,通过相位差判别正转还是反转。

本文系统选用的编码器型号为 E6A2-CW3C 增量式编码器,经过试验各参数和使用效果均符合要求。

1.2.6 液晶显示及按键输入模块

液晶显示与按键模块作为人机交互接口,可以帮助调试人员快速地与智能车进行信息交换,在调车过程中有很大作用。

液晶显示采用 NOKIA5110 和 SPI 接口(可用 IO 口模拟 SPI),使用十分方便,屏幕大小适中,显示清楚。因为需要使用的按键并不多,按键直接采用一个 IO 口对应一个按钮的方式。

1.3 电磁干扰防护

天气干燥时轨道上产生的静电可能对智能车有影响,造成采集信息不准、舵机打舵错误等,影响小车的正常运行。为防止电磁干扰的发生,在电路板设计过程中,首先将模拟电路和数字电路通过磁珠隔开,以避免相互干扰;其次将电路板靠近车体一侧用绝缘胶带封住;保持轨道场地通风、清洁。

2 软件系统设计

2.1 软件系统架构设计

作为智能车的核心,软件系统是决定运行速度和平稳性的关键。主要工作包括对传感器采集到的数据进行处理,选择合适的方法解算轨道信息,制定

合理的转向控制策略使转向平滑快速,制定有效的速度控制策略使智能车平均速度提高。程序总体架构如图 5 所示。

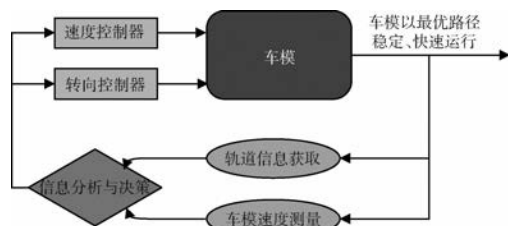


图5 软件控制架构图

软件实现过程的控制流程如图 6 所示。

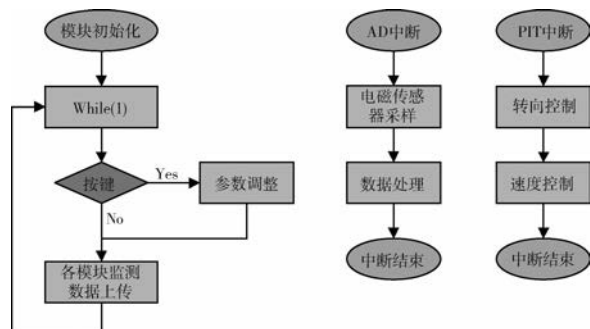


图6 程序流程图

2.2 传感器信息获取及处理

磁场之间存在相互影响,电感之间也存在干扰,因此,在电磁传感器采得一组 AD 采样信号后,为了保证数据的准确,需要进行相应的处理。本文采用循环队列数字滤波的办法,将队列长度取为 9,并选用 Fir 滤波器进行滤波。Fir 滤波器的参数队列为 (0.4、0.1、0.1、0.1、0.1、0.05、0.05、0.05、0.05),实验验证滤波后的信号平滑度以及系统的响应速度均能达到要求。

2.3 轨道位置计算

轨道位置的计算是制定转向控制策略的基础。想要使智能车能够平滑地循迹、合理地转向,首先需要获得准确的导线和智能车的相对位置信息。

因此,在模块设计中,首先需要根据电磁场理论分析磁场信号的分布,然后根据其特征来设计电磁传感器中电感的排布方式,争取最灵敏的检测效果。

2.3.1 电感排布方式的设计及其理论基础

交流导线周围的磁场是一个以导线为轴的圆柱形矢量场,当轨道较为复杂时,磁场分布也会随之变得复杂一些,但大体如图 7 所示。图中, I 为导线中电流, B 为磁感应强度, r 为距离导线中心的垂直距离, μ_0 为真空磁导率。

通过试验可测得,垂直于导线并在水平面内的电感能够很好地反映电感与导线距离和磁场信号强弱的正比关系,如图 8 所示。

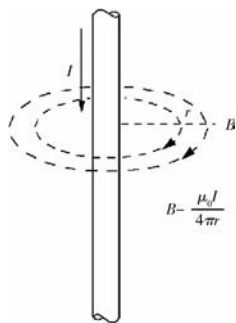


图7 长直导线周围的电磁场

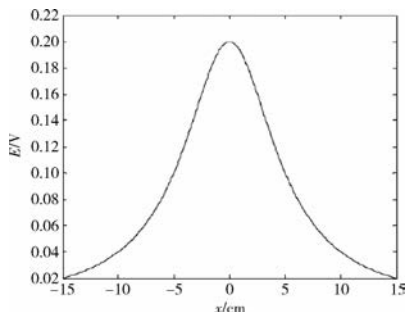


图8 感应电动势E与距离x之间的函数

由图8可知,当电感越靠近导线时获得的电压信号越大,反之越小。因此,可以根据空间上一字排开的多个相同电感分别采集到的信号大小来确定导线的位置。经过试验和比较,最终选取5个电感,且电感之间间隔应为6 cm。所以车前方循迹传感器支架长度应为 $(5-1) \times 6 = 24$ cm,实物图如图9所示。

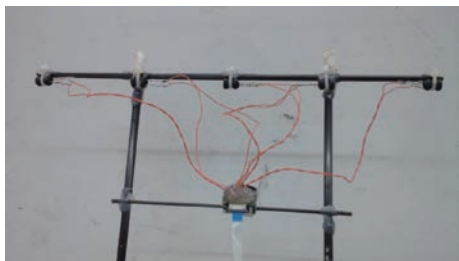


图9 电感排布实物图

2.3.2 轨道定位的量化算法

显然,5个传感器采集到的信号大小关系可以反映出轨道中心导线相对于传感器支架的位置,而传感器支架的位置代表的是车体如果直行将会到达的位置。因此,应根据5个传感器采集的电压信号值,设计具体地计算出导线位置的算法。经过大量的理论推导和试验对比,本文自行设计了一套轨道定位的量化算法,经试验检验效果良好。算法设计思路如下。

首先找到5个传感器中电压值最大的一个,可以确定导线一定离该电感最近。如果该电感不在最两侧,则可以通过其左右两边的电感来协助计算导线的位置,局部定位公式为

$$x = k \frac{s_{\max} - s_{\max-1}}{s_{\max} - s_{\max+1}} \quad (1)$$

式中, x 为局部偏移量, k 为一比例常数, S 为传感器采集到的电压值。

当两侧的电感传感器的值达到最大时,就只能用与其邻近的一个电压值协助进行计算,计算公式为

$$x = k \frac{s_{\max} - s_{\max+1}}{s_{\max} + s_{\max+1}} \quad (2)$$

通过式(1)和式(2)就可以把当前的轨道信息大致地提取出来,以供控制使用。

2.4 转向控制策略

转向控制器使用PID算法,输入为上文求得的导线位置相对于传感器支架正中位置的偏移量,输出为舵机转向角度的大小。直观上,偏移量越大,往往需要舵机以更大的角度转向,以保证循迹。

试验发现,由于智能车运行速度很快,积分项I的加入反而不利于实时性的要求。因此将其去掉,只使用了PD控制。控制周期为5 ms。基本差分方程为

$$u(k) = K_p \cdot e(k) + K_d \cdot [e(k) - e(k-1)] \quad (3)$$

式中, u 为输出, e 为输入, K_p 和 K_d 分别为P项和D项的控制参数。控制策略制定之后,接下来的工作就是通过大量的分析和试验来寻找最合适的 K_p 与 K_d 的值,使得小车在高速行驶时,不论遇到什么类型的跑道,均能够合理打舵、平滑过弯。然而,这也是转向控制中一个最大的难点,经过大量的理论计算和实际调试,也很难找到一组 K_p 和 K_d 的值使得小车在经过各种曲率半径的弯道时都能够十分圆滑顺畅。

最终经过大量试验,本文决定采用分段给定 K_p 和 K_d 的方法,即当车体偏离轨道中心越远时, K_p 和 K_d 的值越大,转向也越急;当偏离不远时, K_p 和 K_d 的值相对较小,转向相对较缓。分段给定 K_p 和 K_d 的方法是到目前为止发现的可以同时兼顾转向的及时性和平滑性的最佳方法。

2.5 速度控制策略

智能车的速度控制主要包括目标速度给定策略和速度的闭环调整两个方面。

2.5.1 目标速度给定策略

通过策略设计和试验验证,本文选定的目标速度给定策略如下。

首先判断智能车是否处于高速入弯状态,如果处于高速入弯状态,则立刻降低速度至某较低的目标速度,以防止智能车过弯不及冲出轨道;如果不处于高速入弯状态,则根据打舵舵角值的变化量逐步调整目标速度。当打舵舵角值的变化在一个较小的范围时,目标速度随当前状况持续时间的延长而逐渐增加,上限值是与该时刻智能车偏移量和舵角值相关的某定值;当舵角值的变化在另一个相对较大

的区间时,目标速度维持不变;当舵角值的变化更大,超过了上述区间时,目标速度随当前状况持续时间的延长逐渐降低。该轨道定位的量化算法成功地克服了智能车在通过长弯道时无法加速的弊端,使智能车对不同跑道均具有很强的自适应性,是整个系统设计创新中比较成功的设计之一。

2.5.2 速度的闭环调整

通过编码器反馈的当前速度值可以实现速度的闭环调整。在闭环控制方面,考虑到控制的快速性和稳定性,本文采用了 bang-bang 控制与 PD 闭环控制相结合的方案。bang-bang 控制有利于控制的力度,PD 控制有利于控制的稳定性,两者结合是一个优势互补的解决方案。

当编码器反馈的当前车速与目标车速的差值大于一定值时,采用 bang-bang 控制使车速尽快到位;当差值小于一定值时,采用 PD 控制。 P 项输入量为当前车速与目标车速的差值, D 项输入量为当前车速与目标车速差值的变化率。通过公式 $K_p * P + K_d * D$ 得到当前的输出控制量。在实际调整中发现,适当增大 P 可以控制的上升时间,使调节更快,但会引起较大的震荡;适当增大 D 可以减小震荡,但会使上升至稳态的时间加长。当车在轨道上行驶时,属于大惯性系统,所以在调整 PD 参数时可以优先考虑 P 项,当达到比较理想的调速时间后再进一步调整 D 值使调速更加平滑顺畅。

2.6 软件开发平台 Keil4.23 简介

由于飞思卡尔 kinetis 系列的单片机新出厂不久,所以一般的集成开发环境即使支持该型号单片机,也都没有很全的库可供使用,需要从阅读厂商提供的芯片资料,研究芯片各模块的初始化代码开始做起。最终本文选择集成开发环境 Keil4.23 进行软件开发。作为各种型号单片机的常用开发环境,Keil4.23 功能齐备,选择其的最主要原因是看中了其强大的在线调试功能。

3 系统主要问题及改进方向

3.1 系统存在的主要问题

目前为止,在总长约 60 m、弯道半径 50~60 cm、直道总长/弯道总长 ≈ 1 的跑道上,智能车跑完需要 22~23 s 的时间。多数情况下,直道平均速度能够接近 3.3 m/s,弯道速度大约 2.5 m/s,总的平均速度接近 3 m/s。尽管已经在智能车的软件、硬件和机械的开发上作了很多努力,但系统仍然存在一些问题,其中比较核心的问题主要集中在软件系统方面。

1) 在智能车瞬时硬件故障的影响下,软件系统的容错能力、可靠性和稳定性亟待加强。

从智能车高速行驶时实时发回至上位机的传感器采集的数据发现,经常会有瞬间错误数据产生,并

伴随着智能车速度和方向控制的不稳定。经过统计,对于一般复杂性跑道,失效强度大概在每分钟(运行时间)10 次左右,其产生的原因可能是外部电磁干扰或者不可避免的瞬时硬件故障。而由于软件系统设计的不够完善,可靠性和容错性都不够高,使不可避免的瞬时故障对控制策略产生了很大影响,极大地干扰了系统的稳定性。

2) 在轨道定位的算法中,对边界情况的处理有待完善。

在本文设计的算法中,当智能车比较靠近轨道中间时,对轨道位置的解算比较精确。但是当智能车距轨道的中心导线已有较大的偏移量时,由于所有的传感器采集的信号都比较小,位置解算值有时和实际值误差比较大,从而会影响软件控制策略和系统的可靠性。

3.2 改进方向

现阶段,首先需要改进的就是智能车系统存在的上述两个问题。对于第 1 个问题,要在保证硬件可靠性的基础上,对软件系统进行可靠性设计,尤其是对该类问题的容错设计,从而提高软件系统的可靠性,保证系统稳定性。对于第 2 个问题,一方面要尝试开发边界定位的新算法,提高精度;另一方面仍然是要提高软件系统的可靠性,当传感器采样值小于一定限度时,进行避错设计,从而避免位置解算值影响系统的输出。

4 结 语

本文通过完整地设计并优化小车的硬件系统、软件系统和机械系统,最终实现了智能车通过自行检测轨道导线激发的电磁波自主循迹行驶,并在保证智能车不脱离运行轨道的前提下,通过软硬件配合和算法优化,使智能车能够在中等难度的轨道上达到约 3 m/s 速度,基本实现设计目标。

智能交通是现阶段国家重点发展的领域之一,基于电磁导航原理的智能车、无人车的研发是其中很重要的一部分。本文系统的开发具有较大的实际意义,对相关技术的运用和系统调试经验,均可为未来实施电磁智能车的设计和开发提供借鉴。

[参考文献] (References)

- [1] 鲁云,赵亮,陈晓东,等. 基于磁导航的两轮智能车系统设计[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2013, 36 (1): 40-45.
Lu Yun, Zhao Liang, Chen Xiaodong, et al. Two-wheeled smart car system design based on magnetic navigation [J]. J Nat Sci Hunan Norm Univ, 2013, 36 (1): 40-45. (in Chinese)
- [2] 林涛,马腾炜,陈亚勋,等. 基于 MCU 的自动寻迹智能车控制系统的设计[J]. 自动化与仪表, 2012, 27 (11): 1-4.
Lin Tao, Ma Tengwei, Chen Yaxun, et al. Control

- system of automatically tracing intelligent vehicle based on the MCU [J]. Automat Instrum, 2012, 27(11): 1-4. (in Chinese)
- [3] 侯代坡, 孔琳琳, 王烁, 等. 电磁导航式智能车控制系统研究[J]. 机械与电子, 2013(2): 20-25.
Hou Daipo, Kong Linlin, Wang Shuo, et al. Structure study on electromagnetic navigation intelligent vehicle detection and control system [J]. Mach Electron, 2013 (2): 20-25. (in Chinese)
- [4] 石晶, 王宜怀, 苏勇, 等. 基于 ARM Cortex-M4 的 MQX 中断机制分析与中断程序框架设计[J]. 计算机科学, 2013, 40(6): 12-19.
Shi Jing, Wang Yihuai, Su Yong, et al. Analysis of MQX interrupt mechanism and design of interrupt program frame based on ARM Cortex-M4 [J]. Comput Sci, 2013, 40(6): 12-19. (in Chinese)
- [5] 孙志安, 裴晓黎, 宋昕, 等. 软件可靠性工程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.
Sun Zhian, Pei Xiaoli, Song Xin, et al. Software Reliability Engineering [M]. Beijing: BeiHang University Press, 2009. (in Chinese)
- [6] 蔡建平. 嵌入式软件测试实用技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
Cai Jianping. Embedded Software Testing Technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010. (in Chinese)
- [7] 南海, 张宝龙, 刘柱. 智能车辆定位导航系统在城市交通中的应用[J]. 交通世界, 2013(4): 31-37.
Nan Hai, Zhang Baolong, Liu Zhu. Application of intelligent vehicle location & navigation system in city traffic [J]. Transport World, 2013(4): 31-37. (in Chinese)
- [8] 赵凯瑞, 陶模, 王明亮, 等. 电磁引导智能汽车设计与关键技术研究[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(3): 487-490.
Zhao Kairui, Tao Mo, Wang Mingliang, et al. Designing intelligent vehicle based on electromagnetic guidance [J]. J Northwest Polytech Univ, 2013, 31(3): 487-490. (in Chinese)

(上接第 382 页)

[参考文献] (References)

- [1] Bhartia P, Bahl I J. Millimeter Wave Engineering and Applications [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1984.
- [2] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds [J]. Nat Photon, 2007, 1(6): 319-330.
- [3] 李尚远. 光控微波波束形成器中的调制技术及性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
Li Shangyuan. Studies on Modulation Techniques and Performance of Optical Beam-Forming Networks [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese)
- [4] Yao Jianping. Microwave photonics [J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(3): 314-335.
- [5] Li Shangyuan, Zheng Xiaoping, Zhang Hanyi, et al. Compensation of dispersion-induced power fading for highly linear radio-over-fiber link using carrier phase-shifted double sideband modulation [J]. Opt Lett, 2011, 36(4): 546-548.
- [6] Li Shangyuan, Zheng Xiaoping, Zhang Hanyi, et al. Highly linear radio-over-fiber system incorporating a single-drive dual - parallel Mach-Zehnder modulator [J]. Photon Technol Lett, 2010, 22(24): 1775-1777.
- [7] Chen Lin, Wen Hong, Wen Shuangchun. A radio-over-fiber system with a novel scheme for millimeter-wave generation and wavelength reuse for up-link connection [J]. Photon Technol Lett, 2006, 18(19): 2056-2058.
- [8] Qi Guohua, Yao Jianping, Seregelyi J, et al. Phase-noise analysis of optically generated millimeter-wave signals with external optical modulation techniques [J]. J Lightwave Technol, 2006, 24(12): 4861-4875.
- [9] Li Long, Zhang Guoqiang, Zheng Xiaoping, et al. Suppression for dispersion induced phase noise of an optically generated millimeter wave employing optical spectrum processing [J]. Opt Lett, 2012, 37 (19): 3987-3989.
- [10] Papoulis A, Pillai S U. Probability, Random Variables and Stochastic Processes [M]. New York: Tata McGraw-Hill Education, 2002.
- [11] Wei Feng, Li Shangyuan, Zheng Xiaoping, et al. Improvement of optically generated adjacent channel interference in RoF systems [J]. Photon Technol Lett, 2013, 25(12): 1137-1140.