

# 电磁导引智能车仿真平台设计与实现

陆正辰<sup>a</sup> 杨明<sup>a</sup> 王冰<sup>a</sup> 王春香<sup>b</sup>

(上海交通大学 a 自动化系; b 机器人研究所, 上海 200240)

**摘要** 设计并实现了一套电磁导引智能车的仿真平台,包括软件仿真和硬件仿真2种模式。前者通过软件模拟电磁导引,计算瞬时传感器状态,解决了电磁导引在动态过程中难以定量分析的问题。后者通过引入缩微车,实现硬件在环,解决了电磁导引中难以建立精确动力学模型的问题。实验结果表明:软件仿真与实际电磁环境相似度高,硬件仿真通过引入硬件在环,可实时观察并记录车体状态与控制效果。因此,该仿真平台适用于电磁导引智能车自主导航研究。

**关键词** 自主导航; 仿真平台; 电磁导引; 智能车; 缩微车

**中图分类号** TP249 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2011)S2-0388-04

## Design and implementation of simulation platform for electromagnetic guided intelligent vehicle

Lu Zhengchen<sup>a</sup> Yang Ming<sup>a</sup> Wang Bing<sup>a</sup> Wang Chunxiang<sup>b</sup>

(a Department of Automation; b Research Institute of Robotics, Shanghai

Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract** Simulation platform was designed and developed for an electromagnetic guided intelligent vehicle, including software mode and HIL (hardware-in-the-loop) mode. In the former mode, the calculation of instantaneous sensor status was realized by software, in order to solve the difficulty in quantitative analysis of the dynamic process in electromagnetic field simulation. In the latter mode, the hardware-in-the-loop simulation was realized by introducing microfilm vehicle, in order to achieve a precise dynamic vehicle model. The results indicate that, software simulation has high similarity with real electromagnetic field. And HIL simulation enables the user to observe and record the real-time status and control effect. Therefore, the simulation platform is suitable for autonomous navigation of electromagnetic guided intelligent vehicle.

**Key words** autonomous navigation; simulation platform; electromagnetic guidance; intelligent vehicle; microfilm vehicle

智能车自主导航实验往往成本较高,且耗时费力<sup>[1-2]</sup>。而采用仿真软件不仅能降低实验成本,且缩短了开发周期。电磁导引技术具有抗干扰,高适应性,不受天气环境变化影响的特点<sup>[3]</sup>,因此已逐步引入到自主导航中。基于光学信号的摄像头与光电智能车仿真技术已逐步成熟,如清华大学的 Plastid 仿真软件<sup>[2]</sup>,上海交通大学的 Cyber-

Smart 仿真软件<sup>[1]</sup>。而目前电磁导引智能车的仿真仍处于起步阶段,主要以采用 Ansoft Maxwell 等专业电磁场分析软件对电磁场环境进行仿真<sup>[4]</sup>。电磁场专业分析软件采用完全参数化的电磁场建模过程,动态变化的过程不能较好地体现,且不能反映车体运行过程中各传感器的变化规律,因此需开发适用于电磁导引智能车的专用仿

收稿日期 2011-06-15.

作者简介 陆正辰(1988-),男,硕士研究生;杨明(通信作者),副教授, E-mail: mingyang@sjtu.edu.cn.

基金项目 国家自然科学基金资助项目(61174178);上海科委世博科技行动计划资助项目(10dz0581100).

真平台。

## 1 仿真平台整体构架

设计的电磁导引智能车仿真平台包括软件仿真和硬件仿真 2 种模式,2 种模式都由车模层、道路环境层、控制层、通信层<sup>[2]</sup>组成。不同之处在于前者的车模层与道路环境层都采用软件模拟产生,通信层只负责软件内部的数据交换。后者的车模层与道路环境层采用硬件在环方式<sup>[1,5]</sup>,通信层采用无线 Zigbee 模块进行数据通信。各层之间的工作流程为:首先在车模层由车体初始位置和方向可得到各传感器的状态值;然后由通信层将传感器状态值传给控制层,控制层通过调用控制算法,得到期望速度和期望转角;再由通信层将控制指令发送到车模层,车模层中进行底层控制,实现速度与转角的底层控制。在道路环境层中,车体在道路上运动,可得到下一时刻车体的位置和方向,不断循环往复。

## 2 软件仿真设计与实现

软件仿真设计难点为:在车模层中根据车体位置与方向以及当前道路信息,对 LC 谐振传感器状态的计算,特别是对于弯道情况的处理。为简化电磁场的计算,可采用无线长直导线进行分析<sup>[3-4,6-7]</sup>,进而改进后推广到弯道。系统架构中引入整体坐标系,可得到任意位置的传感器状态。

考虑如图 1 所示直道,整体坐标系为  $xyz$ ,车体局部坐标系  $x_c y_c z_c$ ,车体局部坐标系原点在整

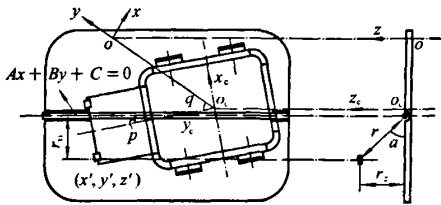


图 1 直道分析图

体坐标系的坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ 。在车体上有 2 个  $x$  方向的传感器,在车体局部坐标系下的坐标为  $(x', y', z')$ ,在整体坐标系下的坐标为  $(x, y, z)$ 。设车体局部坐标系与整体坐标系夹角为  $q$ ,则有如下关系<sup>[8]</sup>:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos q & -\sin q & 0 \\ \sin q & \cos q & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}.$$

设  $xoy$  平面内传感器到直道导引线中心的

最短距离为  $r_{xy}$ ;  $z$  方向上传感器到直道导引线中心的距离为  $r_z = z - z_m$ ,  $z_m$  为导引线高度;由  $r_{xy}$  与  $r_z$  可得  $xyz$  空间上传感器到直道导引线中心的最短距离为  $r$ ;直道中心到传感器的仰角为  $a$ ;直道在整体坐标系下的直线方程为  $Ax + By + C = 0$ ,由直线方程和传感器的整体坐标系坐标可算得水平距离  $r_{xy}$ ;由直线斜率与  $q$  值可算得车体与导引线夹角  $p$ 。

假定传感器线圈横截面各处的磁感应强度近似一致,并仅考虑由交变电流产生的感应电动势,则在整体坐标系下直道上 3 方向的传感器感应电动势近似值分别为<sup>[4]</sup>:

$$\epsilon'_x = |K(z - z_m) \cos p / [(Ax + By + C)^2 / (A^2 + B^2) + (z - z_m)^2] |;$$

$$\epsilon'_y = |K(z - z_m) \sin p / [(Ax + By + C)^2 / (A^2 + B^2) + (z - z_m)^2] |;$$

$$\epsilon'_z = |K(Ax + By + C) / \{\sqrt{A^2 + B^2} [(Ax + By + C)^2 / (A^2 + B^2) + (z - z_m)^2] \} |,$$

式中系数  $K$  可参考文献[6-7]的方法并简化得到,并根据实验进一步修正。对于图 2 所示的弯道,设弯道圆弧导引线中心坐标为  $(x_m, y_m, z_m)$ ,弯道半径为  $R$ ,则可算得  $xoy$  平面内传感器到弯道导引线中心的水平距离  $r_{xy}$ ,连接传感器与弯道

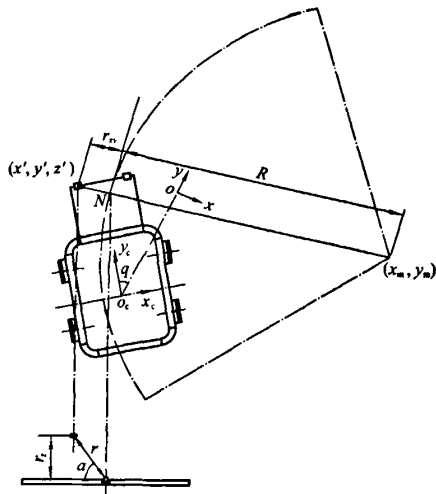


图 2 弯道分析图

圆心,设与弯道中心相交于  $N$  点,则根据  $N$  点处的切线方程的斜率与  $q$  值可计算出车体与导引线的夹角  $p$ 。可得在整体坐标系下弯道中传感器感应电动势近似公式<sup>[4]</sup>:

$$\epsilon'_x = |K(z - z_m) \cos p / \{[(x - x_m)^2 + (y - y_m)^2]^{1/2} - R\}^2 + (z - z_m)^2 \} |;$$

$$\epsilon'_y = |K(z - z_m) \sin p / \{[(x - x_m)^2 +$$

$$\begin{aligned} & (y - y_m)^2)^{1/2} - R]^2 + (z - z_m)^2) |; \\ \epsilon_r' = & K | \sqrt{(x - x_m)^2 + (y - y_m)^2} - R | / \\ & [(\sqrt{(x - x_m)^2 + (y - y_m)^2} - \\ & R)^2 + (z - z_m)^2]. \end{aligned}$$

道路环境层由软件虚拟的道路模型构成。本文延用了 CyberSmart 仿真软件<sup>[1]</sup>中使用的道路与车体模型构成道路环境层。控制层通过动态调用控制算法的方式下达控制指令,只需符合接口定义标准即可。通信层负责实现各层间的数据交换,由软件内部实现。

### 3 硬件在环仿真设计与实现

硬件仿真模式下,车模层采用按比例缩小的缩微车模模拟真实车体,并应用 MC9S12XS128MAL 单片机对车模进行控制,包括信号采样模块、串行通信接口(SCI)通信模块、舵机与电机脉宽调制器(PWM)驱动模块、电源模块等模块<sup>[1]</sup>,其中信号采样模块包括传感器和处理电路。车模上安装2个x方向LC谐振传感器,谐振频率20 kHz。经过滤波处理电路后,进行AD采样。SCI通信模块采用SCI串口作为与通信层交互的接口。舵机与电机PWM驱动模块中测速部分采用E6A2-CS3C型编码器,并利用单片机的脉冲累加功能和定时中断计时器(PIT)定时中断功能进行测速。PWM驱动部分采用单片机输出PWM信号,再通过驱动电路控制电机转动。

道路环境层由真实铺设电磁导引线的泡沫板道路模型构成。采用电磁信号源产生方波信号,电流有效值为100 mA,频率为20 kHz。通信层用于实现车模层与控制层之间的数据交换。本系统选用了 ZigBee 无线模块来构建车模层与控制层的数据通信,具有能耗低,质量轻,通信实时性好等特点<sup>[1]</sup>。上位机控制层通过通信层获得车模传感器的状态,然后以动态调用控制算法的方式获得期望速度与转角,再通过通信层下达控制指令。用户只需修改控制算法即可进行调试。同时也可在上位机观察车体运行过程中,各传感器值的变化规律,并查看日志文件,进一步分析数据。

### 4 实验测试

实验测试分为软件仿真、硬件在环仿真和硬件实验3个阶段。软件仿真采用 Labview<sup>[9]</sup>进行编写,其中道路环境层设计包括了大小S型弯道、

十字型等多种类型。车模层传感器配置为2个x方向的探头,传感器坐标分别为(-0.097 5, 0.17, 0.05)和(0.097 5, 0.17, 0.05),仿真得到的转角指令和实际速度如图3和4所示,图中: $\alpha$ 为舵机转角; $v$ 为速度; $t$ 为时间。

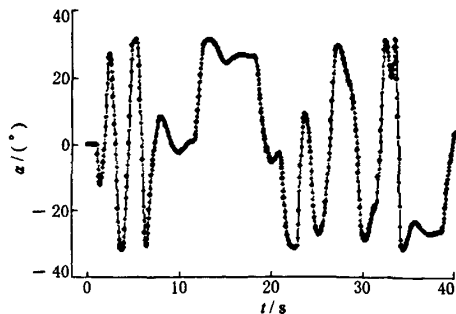


图3 软件仿真转角指令

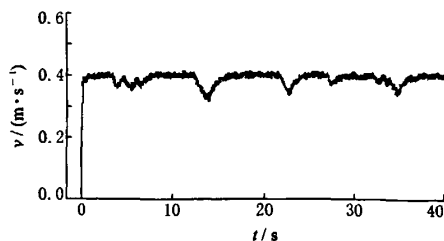


图4 软件仿真实际速度

硬件在环仿真中,首先搭建KT板道路模型,并连入电磁信号源作为道路环境层。其次,搭建缩微车作为车模层,传感器配置不变,控制算法在上位机进行设计,通过无线通信实现车体控制。仿真得到的转角指令和实际速度如图5和图6所示。

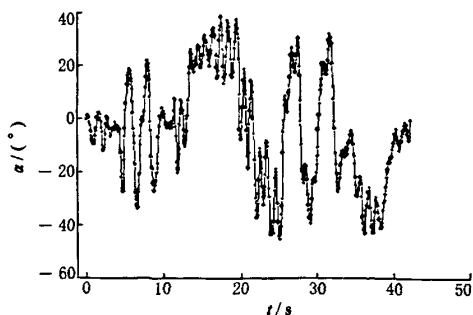


图5 硬件仿真转角指令

硬件实验是去除上位机控制层和无线通信层,将控制算法直接载入到车体控制系统,通过回放运行过程中的参数,可获知实际自主导航过程中的运行效果。具体运行过程中转角指令与速度如图7和图8所示。

比较上述实验结果可知:软件仿真模拟的电磁导引效果与实际电磁导引效果基本一致。硬件仿真采用上位机控制,可实时观察并记录传感器

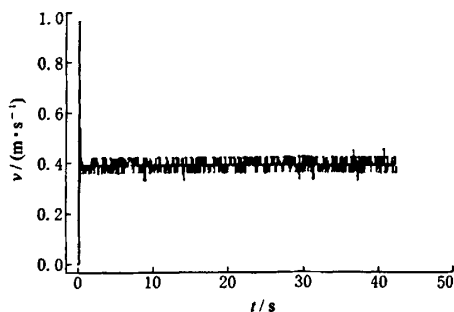


图6 硬件仿真实速度

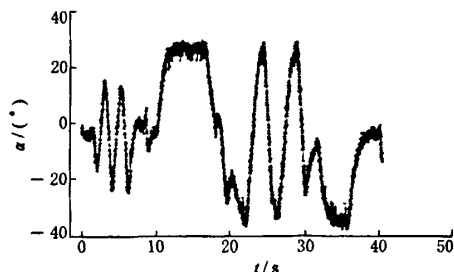


图7 硬件实验转角指令

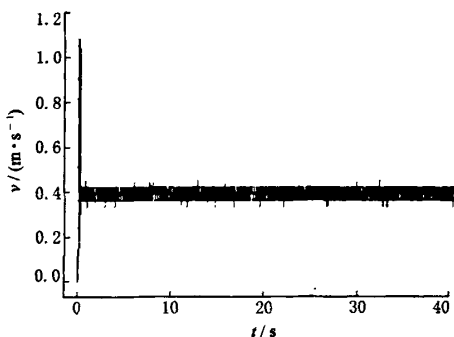


图8 硬件实验实际速度

信号等数据变化过程。由于实际硬件实验去除了上位机无线控制,因此具有更好的实时控制效果,转角指令更加平滑,速度控制更稳定。设计的智能

车仿真平台具有如下特点:**a.** 软件仿真可一定程度上模拟真实电磁场环境下的 LC 谐振传感器状态,且具有成本低、开发周期短特点。**b.** 硬件仿真可实时观察并记录车体状态与控制效果,便于跟踪程序动态运行过程,为调试复杂算法提供了一个良好的平台。

在今的研究中将逐步把本仿真平台引入到其他电磁导引传感器方案的仿真中,以便于比较不同方案之间的控制效果。同时,硬件仿真中由于通信延迟造成的控制滞后也是后期须考虑的问题。

### 参 考 文 献

- [1] 方兴,杨明,彭新荣. 智能车硬件在环仿真系统的设计与实现[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(S1): 258-261.
- [2] 周斌,蒋获南,黄开胜. 基于虚拟仪器技术的智能车仿真系统[J]. 电子产品世界, 2006(3): 132-134.
- [3] 张昊颢,马旭,卓晴. 基于电磁场检测的寻线智能车设计[J]. 电子产品世界, 2009, 16(11): 48-50.
- [4] 李仕伯,马旭,卓晴. 基于磁场检测的寻线小车传感器布局研究[J]. 电子产品世界, 2009, 16(2): 41-44.
- [5] 李升波,王建强,李国强. 硬件在环仿真试验台监控系统的设计与开发[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(16): 3684-3687.
- [6] 尹继武. 磁导航智能车中的水平检测线圈特性分析[J]. 陕西理工学院学报: 自然科学版, 2010, 26(4): 18-21.
- [7] 尹继武,龙姝明,孙彦清,等. 基于智能车的磁场检测线圈特性分析[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2010, 38(4): 85-87.
- [8] 洪嘉振,杨长俊. 理论力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [9] 陈锡辉,张银鸿. Labview 8.20 程序设计从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

(上接第 387 页)

### 参 考 文 献

- [1] 万年丰. 智能车多车协作算法研究[D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2010.
- [2] Moshe A P, Abishai P, Moshe L. A decision model for gap acceptance and capacity at intersections[J]. Transportation Research, Part B: Methodological, 2002, 36(7): 649-663.
- [3] Chin H C, Quek S T. Measurement of traffic conflicts[J]. Safety Science, 1997, 26(3): 169-185.

- [4] 杨建国,王兆安,李庆丰. 混杂交通微观仿真初探[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(6): 1115-1117.
- [5] 肖永剑,杨建国,王兆安. 基于占先度的驾驶员冲突避碰决策模型[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(5): 116-120.
- [6] 罗珀. 博弈论导论及其应用[M]. 北京: 中国政法大学出版社, 2005.
- [7] 赵晓华,李振龙,于泉,等. 基于 Q 学习算法的两交叉口信号灯博弈协调控制[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(18): 4253-4256.