

ETC 车道控制系统自动测试的设计与实现^①

Design and Implementation of Auto-Test for ETC Toll-Gate Control System

臧海成 雷跃明 凌宗炎 (重庆大学 软件学院 重庆 400044)

摘要: 通过分析实际的 ETC 车道控制系统, 基于面向对象的思想, 设计和实现了一种扩展性良好的 ETC 车道控制系统的自动测试方案, 以完成对车道控制系统的功能和性能测试, 提高测试效率。该测试方案通过分析 ETC 车道的实际通车情形, 建立了 ETC 车道的交通仿真模型和交易过程仿真模型, 保证了测试的有效性。

关键词: ETC 车道控制系统 自动测试方案 交通仿真

1 引言

ETC(电子不停车收费)系统是一个集中了微波通信、电子控制和计算机网络等多项技术在公路自动收费综合系统中的应用。当车辆通过 ETC 车道时无需停车, 利用 RSU(路侧天线设备)和 OBU(车内设备)的无线通信自动完成收费交易, 车道内无需收费人员职守。目前该系统在国际上很多国家都已广泛应用, 我国的广东省和北京市都已兴建了大量 ETC 车道并投入使用, 福建、杭州、重庆等地也在积极建设。

但由于该系统集成设备较多, 车辆通行情况复杂, 如果仅仅依赖于现场测试, 工作效率较低, 很难保证系统正式使用时的稳定性。另外 ETC 系统在建成之初, 由于 ETC 车辆数量较少, 也很难组织大量车辆对 ETC 系统进行压力测试。

针对以上问题, 本文设计与实现了一种 ETC 车道系统的自动测试方案, 利用软件仿真车辆通过 ETC 车道的情形, 在实验室完成对 ETC 车道系统的各种功能和性能测试, 提高了测试效率。

2 ETC车道系统的体系结构

ETC 车道控制系统的运行过程实际上是对车道里所有相关外部设备的一个有序测控过程。通常它需要具备以下功能: 车辆进出检测、收费交易、车牌抓拍与识别、交通指挥、数据保存与上传。下面以某市栏杆后置式 ETC 车道布局为例(具体如图 1 所示), 说明

ETC 车辆在收费站通过 ETC 车道的基本流程:

(1) ETC 车辆驶入 ETC 车道时, 首先触发地感线圈 1 并进入微波通信区域。此时系统通过地感线圈 1 检测到车辆的驶入, 将该车辆加入系统队列中; 然后启动 RSU 设备, 与处在通信区域内的 ETC 车辆完成交易。

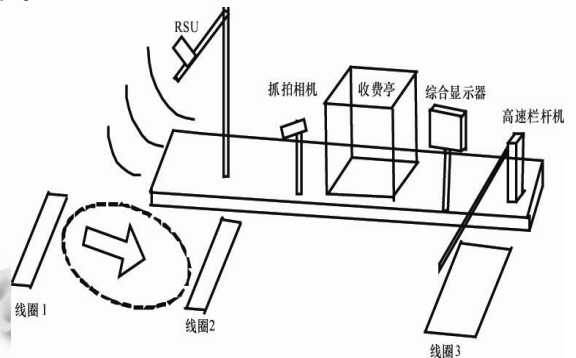


图 1 ETC 车道布局

(2) 系统根据交易结果, 控制栏杆机是否及时抬起或保持落下状态, 以及综合显示屏的信息提示。

(3) ETC 车辆继续向前行驶, 当触发地感线圈 2 时, 系统将启动抓拍摄像机进行车牌的抓拍和识别。

(4) 如果交易不成功, 车辆将在收费亭处由人工完成交易处理。处理完毕, 栏杆抬起, 将车辆放行。

(5) 在 ETC 车辆通过 ETC 车道后(由线圈 3 检测到), 系统及时将本次交易的信息进行保存和上传。

ETC 车道控制系统按功能模块划分, 可分为四个

^① 收稿时间:2008-10-06

部分：界面显示模块、设备检测与控制模块、OBU 与 RSU 交易模块、数据存储和上传模块。其中设备检测与控制模块是整个系统的核心，负责对车道里所有相关外部设备进行有序测控，并调用相应的模块，保证 ETC 车辆顺利完成交易通过 ETC 车道。具体如图 2 所示(不包括虚线表示部分)。

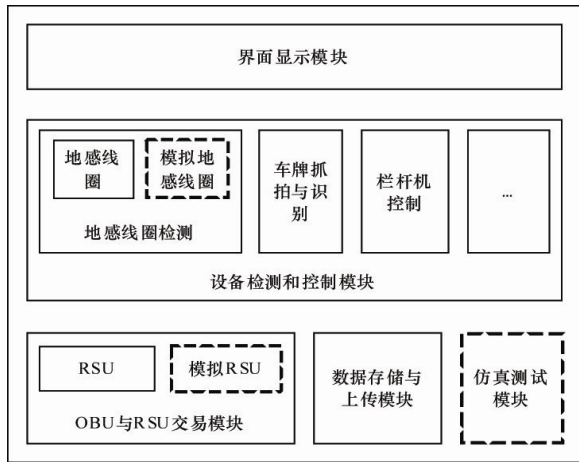


图 2 ETC 车道控制系统自动测试的体系结构

3 ETC车道系统的自动测试的设计

该测试方案利用软件模拟部分硬件设备，在实验室搭建 ETC 车道系统仿真环境，通过对虚拟设备的控制，仿真车辆通过 ETC 车道的过程，完成对 ETC 车道系统的自动测试。

当车辆通过 ETC 车道时，向 ETC 车道系统提供输入信号的设备主要包括地感线圈、RSU 和抓拍相机。但抓拍的车牌由于受识别率的限制，通常其识别结果并未参与后续的逻辑判断。所以在 ETC 车道仿真环境中只需仿真地感线圈和 RSU 的工作状态，摄像机使用真实设备即可。

测试系统的实现主要包括四个部分：

- (1) 用软件仿真地感线圈的输入/输出状态；
- (2) 用软件仿真 RSU 设备的数据接收/发送，模拟 OBU 与 RSU 的交易过程；
- (3) 用虚拟化设备替换原硬件设备，完成测试系统与主系统的集成；
- (4) 为测试系统提供初始化界面，完成对相关参数的设置。

ETC 车道控制系统自动测试的体系结构具体如图 2 所示(虚线为测试系统部分)。

地感线圈的输入/输出状态是对车辆通过 ETC 车道过程的反应，为保证仿真的地感线圈状态符合真实情况，本文建立了 ETC 车道交通仿真模型，对进入 ETC

车道的车辆数量、密度、和车道内的行驶情况等进行了分析与研究。通过分析 OBU 与 RSU 之间的通信过程，结合设备厂商的测试数据，亦建立了 OBU 与 RSU 的通信仿真模型。通过模型的建立，保证了测试的有效性。

3.1 ETC 车道交通仿真模型

通常将车辆的交通仿真模型分为两部分，分别是车辆的发车模型，描述车辆的启动状态；另外是车辆的行驶模型，描述车辆的行驶过程。

3.1.1 车辆的发车模型

车辆的发车模型描述了车辆进入车道的初始状态(如车牌号码、速度、车型、收费类型等)，以及与前后车辆之间的关系。这是仿真车辆通过 ETC 车道的前提和基础。

在设置了 ETC 车道的收费站，为了确保车辆通过时其自动交易能顺利完成，所有 ETC 车道都规定了最高行驶速度，并要求车辆匀速通过。为达到测试强度和提高测试效率，该测试方案设定通过 ETC 车道的车流量为最大强度，即在测试期间车辆不断驶入车道，每辆车之间的间隔均为最小安全距离。

(1) 车辆的初始速度

该测试方案在尽量还原 ETC 车道的真实车流情况的前提下，为了增加测试系统的可控性，便于重现特定情况下的通车情形，车辆驶入车道的速度由初始值和波动值两个参数确定。

$$v = v_0 \pm \lambda \quad (v \leq v_{\max}, 0 \leq \lambda \leq v_0) \quad (1)$$

其中， v_{\max} 为 ETC 车道最高限速， v_0 和 λ 由用户初始化设定。

(2) 车辆间的最小安全间距

通常情况下，当跟随车驾驶员及时发现引导车制动信息灯亮，随之制动，直至停车需要经过三个阶段，即跟随车驾驶员制动反应时间 t_r 、车辆制动协调时间 t_b 和持续制动时间 t_c 。所以求出跟随车在这三个阶段的行驶距离 L_f ，以及引导车制动下的行驶距离 L_h ，便可求出车辆的最小安全间距。

$$L_s = L_f + L - L_h \quad (2)$$

其中， L 为停车后引导车和跟随车之间的距离。

分别计算出 L_f 和 L_h ，带入公式(2)，得

$$L_s = v_f(t_r + t_b) + \frac{v_f^2}{2a_f} + L - \frac{v_h^2}{2a_h} \quad (3)$$

其中， v_f 、 v_h 分别为制动时跟随车和前导车的初始速度， a_f 、 a_h 分别为跟随车和引导车的制动减速度。

(3) 最大强度下，发车的间隔时间则为

$$T = \frac{L_s}{v_h} \quad (4)$$

(4) 车辆的车型和收费类型的确定

根据研究，到达收费站的车辆类型和收费类型都是符合均匀分布。下面以车型分布为例说明如何使用(0,1)区间上的均匀分布随机数来确定车辆的车型。测试系统中共有 4 种车型：微型车、小型车、中型车、大型车。4 种车型的百分比例为 $x_1 : x_2 : x_3 : x_4$ 。随机数 X 服从(0,1)上的均匀分布，若随机数 $X \cdot 100$ 的值大小在(0, x_1)之间，则车辆车型为微型车；若 X 的值在(x_1 , x_2)之间，则车辆为小型车；若 X 的值在(x_2 , x_3)，则车辆为中型车；否则为大型车。

车辆的收费类型确定与上述相同。

(5) 车辆的车身长度

车辆的长度由车型决定，每个车型决定了其基本长度，但由于每个厂商的车辆长度都有些差异，所以车辆长度为：

$$L = L_i \pm \mu \quad (i=1,2,3,4, \mu > 0) \quad (5)$$

其中， L_i 为各型车的基本长度， μ 为一个随机波动值，为用户初始化设定。

3.1.2 车辆的行驶模型

车辆在 ETC 车道通过时，会触发车道内铺设的地感线圈，ETC 车道系统通过检测地感线圈的状态，判断车辆驶入车道的那个位置，并触发相关设备，保证车辆自动完成过车交易并顺利通过车道。当车辆压在地感线圈上时，地感线圈为高电平状态；当车辆驶离地感线圈时，地感线圈为低电平状态。

下面以某市栏杆后置式 ETC 车道布局为例，说明车辆在 ETC 车道的行驶过程，具体如图 3 所示。

① 线圈持续保持高电平状态的时间分别为

$$T_{s1} = T_{s2} = \frac{L_n}{v}, \quad T_{s3} = \frac{L_w}{v} \quad (6)$$

② 车辆到达线圈 1、线圈 2 和线圈 3 的时刻分别为

$$T_1 = 0, \quad T_2 = \frac{L_1 + L_n}{v}, \quad T_3 = \frac{L_1 + L_2 + 2L_n}{v} \quad (7)$$

其中， v 为车辆在 ETC 车道内的行驶速度。

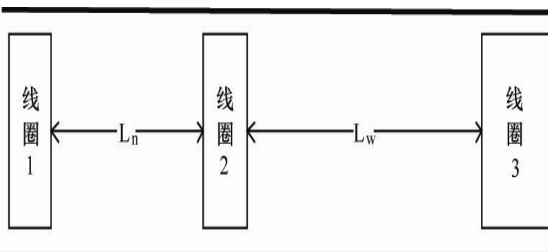


图 3 ETC 车道内线圈布局

3.2 OBU 与 RSU 的交易仿真模型

车辆在驶入 ETC 车道内进入 RSU 的通信区域时，RSU 设备向通信区域发布广播信息(BST)，车内的 OBU 发送信息(VST)进行响应并建立连接。然后 RSU 按照通信协议依次从 OBU 中获得车辆信息、IC 卡信息，并发送到车道控制系统进行判断，系统处理后，向 RSU 发送 IC 卡回写信息，完成扣款，交易过程完成。

目前，我国生产的国标天线都是采用了高速串口作为 RSU 与计算机的通信接口。用软件仿真一个串口设备，通过分析 OBU 与 RSU 的通信协议，便可用软件模拟 OBU 与 RSU 的交易过程。首先，根据驶入的车辆信息，生成 RSU 发向计算机的各帧数据。然后仿真出 RSU 从 OBU 获得各帧数据并传送到计算机串口设备所花费的时间。

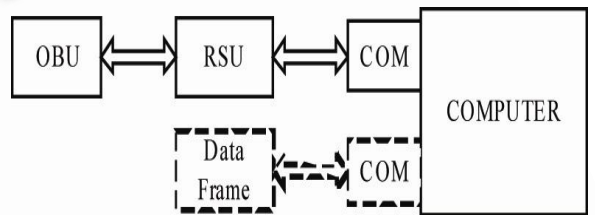


图 4 OBU 与 RSU 的通信模型

在设备生产厂商的协助下，我们对大量电量一定的 OBU 进行了测试，统计发现其交易时间近似符合正态分布。于是在测试系统中我们假定 OBU 的交易时间符合正态分布，使用正态分布随机变量来描述交易时间，记为 $T \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。

对于均值为 $\mu = 0$ ，方差 $\sigma^2 = 1$ 的标准正态分布，其分布函数为 $F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 。自动测试系统中首先采用 Box-Muller 的舍选法产生标准正态分布随机变量 X 。然后对于 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 的非标准正态分布的随机数，其随机变量的值为 $X = \mu + \sigma x$ 。

4 ETC车道系统自动测试的实现

该测试方案的实现充分利用面向对象的思想，对所有仿真设备提供了与真实设备相同的操作接口，对内部实现进行有效的封装。

创建了 CEmuSensor 类，用于模拟地感线圈。根据建立的 ETC 车道交通仿真模型实时更新模拟线圈的状态，仿真车辆通过 ETC 车道的情形。首先，根据建立的发车模型，由 CGenerator 创建一个线程负责产

生连续进入车道的车辆。然后，为每个将进入车道的车辆都创建一个线程，用于模拟该车辆在车道的行驶过程。在车辆的行驶线程里，根据车辆到达的位置，依次触发相应设备的状态。例如在到达第一个线圈的位置时，首先根据车辆的属性调用 `CMessage::Update()`方法生成模拟 OBU 与 RSU 交易时使用的数据帧；然后调用 `CEmuSensor::Update()`设置线圈 1 的状态。具体如图 5 所示。

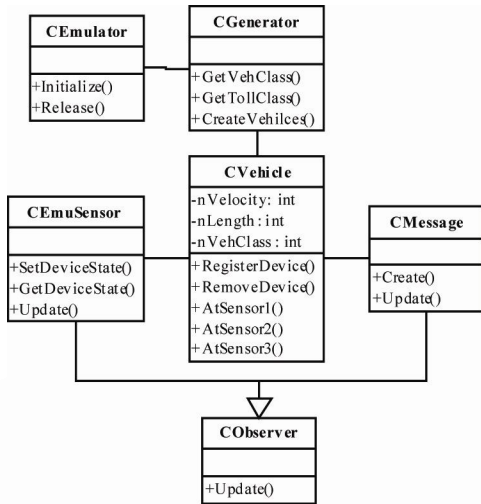


图 5 ETC 车道的交通仿真模型实现类图

由于 RSU 设备都是采用串口通信作为与主机的通信接口，所以创建 `CEmuComm` 虚拟串口类，根据 OBU 与 RSU 的交易仿真模型和预先生成的交易数据帧便可模拟其交易过程，该类提供了与 `CMSComm` 相同的操作接口。

将测试模块集成到主系统中，只是简单的用虚拟设备替换原设备操作，所以利用条件宏便可实现，编译时根据宏的设置决定是否执行为测试版本。

不同地方的收费站通常会因需求的不同，增加或减少车道中的设备。考虑到对 ETC 车道控制系统多变的适应性，在测试系统中使用了观察者模式。观察者模式定义了对象之间的一对多依赖，当一个对象改变状态时，它的所有依赖者都会收到通知并自动更新。将车辆对象定义为主题，车道里的虚拟设备定义为观察者。当车辆行驶到线圈位置时，调用该线圈处所有设备的 `Update()`方法即可触发设备。这种设计降低了对象间的依赖程度，使测试系统能够适应多种变化。

5 结语

利用该自动测试系统针对某市 ETC 车道控制系统进行了测试，在表 1 中列出了测试执行情况。利用该测试系统不仅可完成全面的功能和性能测试，还提高了测试效率，保证了软件开发进度按期完成。

表 1 某市 ETC 车道控制系统测试结果

车辆状态	ETC、MTC、IC 卡过期、OBU 已拆卸、…
车类	微型车、小型车、中型车、大客车
卡类	优惠卡、公务卡、储值卡、非法卡
车速	<5km/h、5~10 km/h、…、30~40 km/h
车距	≤1m、5~10m、…、≥10m
测试结果	<p>① 当车距大于 10m 时，模拟通行 57600 车次，耗时 8 小时，系统处理正常，交易正常完成。</p> <p>② 当车距小于 10m 时，模拟通行 2250 车次，耗时 20 分钟，程序会发生死锁的情况，导致后续交易不能正常进行。</p> <p>③ 对系统进行连续运行的压力测试，模拟通行 1209600 车次，耗时 7x24 小时，系统运行良好，内存使用量稳定。</p>

本文基于面向对象的思想，设计和实现了一种扩展性良好的 ETC 车道控制系统的自动测试方案，完成对 ETC 车道控制系统的各种功能和性能测试，也为在实验室重现现场测试场景提供了一种方法。该测试方案通过分析 ETC 车道的实际通车情形，建立了 ETC 车道的交通仿真模型和交易过程仿真模型，保证了测试的有效性。

参考文献

- 1 刘浩,王笑京,刘佐.收费站 ETC 改建方案计算机的仿真.计算机辅助工程,2001,(2):11-18.
- 2 李行善,等.自动测试系统集成技术.北京:电子工业出版社,2004.
- 3 交通部公路科学研究院.GB/T20851.5-2007.电子收费专用短程通信.北京:中国标准出版社,2007.
- 4 吴炜,丁月华,文贵华.ETC 车道控制系统的设计与实现.计算机工程,2001,27(5):161-163.
- 5 邓明哲,阮祥发.高速公路最小安全行车车间距离数学模型的研究.中国水运,2006,6(6):109-110.