

## 基于PXI和 cRIO的电子稳定 程序(ESP)硬件 在环仿真平台开发



ESP混合仿真试验 台外观

"依托NI公司的强 大的图形化编程语言 LabVIEW，结 合先进的PXI和 cRIO硬件平台， 我们在很短的时间内 快速搭建完成了可靠 的ESP硬件在环仿 真平台。"

- 李 红志, 清 华大学

### 挑战:

电子稳定程序 (Electronic Stability Program, 以下简称ESP)是最新一代汽车主动安全类产品，在国外中 高档轿车上已广泛安装，但在国内尚处研 发初期。测试ESP 控制算法的实车试验不仅具有相当的危 险性，而且对场地要求 十分苛刻。因此，急需搭建ESP硬件在 环仿真平台完成算法 的验证任务。该仿真平台的快速成功搭 建，将极大地缩减 ESP控制算法的开 发周期。

### 解决方案:

使用NI公司的 PXI和cRIO硬 件平台结合NI的图 形化编程软件 LabVIEW快速 并成功地搭建了 ESP硬件在环仿真 平台。其中，PXI平台运行 LabVIEW编写 的整车动力学模型算 法模拟整车运动，cRIO平台运行 LabVIEW编写 的ESP控制算法实 时监控车辆状态并依 此执行反馈控制，上 位机通过使用 LabVIEW提供 的网络共享变量等技 术实时地监控整个仿 真过程并保存、分析 和显示监控数据，三 个设备间通过网络相 连交互数据。特别是 由NI的仿真模块搭 建的整车动力学模型 具有15个自由度， 状态更新速度达到 1ms，能有效地对 车辆运动状态进行仿 真。

### 作者:

李 红志 - 清华 大学

Li Hong- zhi - [Tsinghua University](http://Tsinghua University)

### 1、项目背景

汽车电子稳定程序 (ESP)是提高汽 车行驶稳定性和安全 性的重要装置。它集 成了制动防抱死系统 (ABS)、牵引力控制系统 (TCS) 以及主动横摆力矩控 制系统 (AYC)，能 有效地改善汽车在 制动、驱动和转向等 工况下的行驶稳定性 和安全性。在汽车行 驶过程中，ESP控 制器不断检测汽车运 动状态，一旦发现危 险，迅速由控制器发 出指令给制动系统和 发动机，通过干预防 解危险。在全球范 围，ESP有望成为 汽车法定配置，美国 高速公路交通管理局 规定在2011年以 前4.5吨以下的新 车必须安装ESP。ESP技术一直被国 外几家大公司所垄 断，目前国内虽然有一些单位做了相关的 研究工作，但是大多 处于分析计算和纯软 件仿真的阶段。

汽车安全与节能国家 重点实验室的汽车动 力学与控制课题组从 事汽车动力学与控制 方面的研究近20 年，在汽车主动安全 领域积累了大量试验 数据、控制方法、试 验设备、专业人才。 课题组与沈阳华晨公 司、武汉元丰汽车电 控系统有限公司三方 签订了中华尊轿车 ESP研发项目合 同，本文介绍的 ESP硬件在环仿真平台即应用于该研发 项目

构建平台前通过深入 调研比较了XPC、PXI、dSpace三种方 式的硬件在环实现设 备。XPC方式费用 较低，但是使用不够 方便，dSpace方 式价格远远高于 PXI方式，然而两 者性能差别不是很大。综合考虑性能、 价格、易实现性等各 因素，本项目最终选 定了NI公司的 PXI和cRIO方 案完成平台构建。最 终构建成型的ESP硬件在环仿真平台作为离线仿真到 原型测试的中间环 节，提高了仿真精 度，能够实现如下功 能：

精确地反映整车 在线性及非线性范围 内的运动状态；  
通过硬件在环仿 真对原型控制器和控 制算法进行测试；  
基于实验实测数 据逆变产生相应的模 拟信号，对控制器中 的算法进行测试；  
方便地进行数据 存储、分析处理和显 示。

ESP硬件在环仿真 平台的搭建，加快了 ESP的开发进程， 降低了开发成本。

### 2、ESP硬件在环 仿真平台构架

ESP硬件在环仿真 平台由上位机、下位 机、控制器、执行 器、传感器五部分构 成。

1) 上 位机:为PC机，用 于监控仿真过程，保 存、分析和显示仿真 结果。

2) 下 位机:在PXI平台 上实现，为实时操作 系统，运行整车动力 学模型，目前采用的 是15自由度整车模 型，能很好地模拟整 车在制动、驱动、高 速转向以及联合工况 下的响应。

3) 控 制器:先由运行着 ESP控制算法的 cRIO平台作为快 速原型，算法被验证 合格后再将程序移植 到单片机中。控制器 上运行ESP控制算 法，执行对车辆的反 馈控制。

- 4) 执行器:为液压控制单元、制动管路以及制动器,用于实现对轮缸的增减压。
- 5) 传感器:为压力传感器,获取各个轮缸以及主缸的压力值,并将压力信号传给控制器和下位机。

此外,上位机、下位机和控制器三者通过网络互连交互数据,上位机对仿真过程的状态监控通过使用LabVIEW提供的网络共享变量技术实现,其它信号通过信号线在硬件平台间传递。ESP仿真平台结构简图见图1。

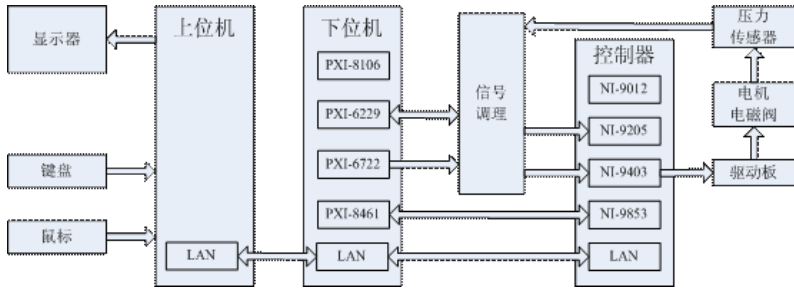


图1 ESP硬件在环仿真平台结构简图

启动仿真后,下位机以1ms的运算周期,根据上位机传过来的道路状况、驾驶员输入、压力传感器信号和整车模型运算出车辆的各个状态参数,输出车辆运行中的各种参数给控制器和上位机;控制器运行ESP控制算法根据这些信号的运算结果实现对车辆运动实际和名义状态的判断,并控制节气门和液压控制单元动作,从而实现主动控制;传感器将轮缸压力、加速踏板、制动踏板等信号再输出给下位机和控制器。如此,ESP硬件在环仿真平台构成了一个闭环控制系统。

ESP硬件在环仿真平台主要包括两个核心算法:

- 1) 整车动力学模型:仿真运算的核心部分,由LabVIEW的仿真模块编写,运行在PXI平台上。这里采用的是课题组开发的15自由度整车动力学模型见图2。这15个自由度分别是:悬上质量3个平动自由度、3个转动自由度、4个轮子的上下跳动自由度和转动自由度、转向系统的非线性1个自由度。仿真运算中还加入了发动机模型、传动系统模型、转向系统模型、悬架模型、轮胎模型等等,综合完成了对整车运动的仿真。经过与实车实验数据对比,15自由度的整车动力学模型能很好地反映车辆在非线性及非线性范围内的动力学特征。

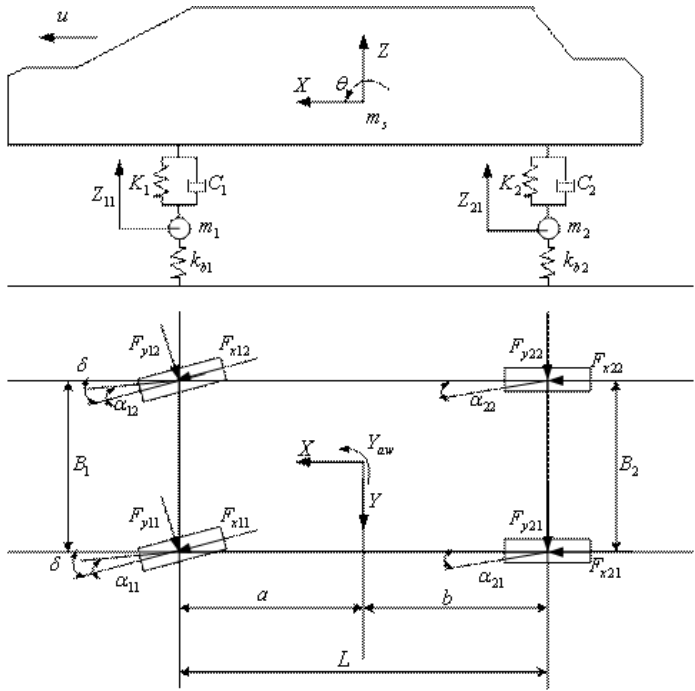


图2 十五自由度整车模型

- 2) 控制算法是一种基于状态的反馈控制的算法,运行在cRIO平台上。为方便程序移植,控制算法采用LabVIEW通用的逻辑模块搭建,采取状态机的整体结构,方便程序的不断更新和完善。

### 3、ESP硬件在环仿真平台硬件设计

ESP硬件在环仿真平台硬件主要包括上位机、下位机、控制器、执行器、传感器五部分,这里主要说明下位机、控制器和执行器的构建。

#### 1 下位机

下位机在PXI平台上实现,运行整车动力学模型算法。下位机主要完成以下功能:

- 1) 计算车辆运动状态;

- 2) 采集传感器信息;
- 3) 提供相关信号给控制器。主要有制动信号,主缸压力信号,四个轮速信号,方向盘转角信号,横向加速度信号,横摆角速度信号;
- 4) 通过CAN总线接收控制器发出的发动机控制指令,从而控制发动机模型的输出扭矩。

PXI平台实现上述功能的方式如下:

- 1) 通过仿真模块搭建的车辆模型来计算车辆运动状态;
- 2) 通过M系列数据采集卡 PXI-6229的模拟输入功能采集主缸和各个轮缸的压力信号以及制动信号;
- 3) 通过模拟输出模块 PXI-6722的模拟输出功能输出电压来表示方向盘转角、横向加速度、横摆角速度以及通过电压转换模块将电压转换成对应的频率信号来模拟四个轮速信号的输出;
- 4) 通过高速CAN接口卡 PXI-8461接收和发送CAN总线信号。

## 2 控制器

控制器先由cRIO平台作为快速原型,执行ESP控制算法,通过模拟输入模块NI-9205采集模拟电压,得到各个传感器的输出信号。通过数字输入输出模块NI-9403的输入功能来获取制动信号和轮速信号,通过NI-9403的数字量输出功能来控制液压控制单元的动作。通过高速CAN接口模块NI9853接收和发送CAN总线信号。

## 3 执行器

执行器上的液压控制单元采用Bosch的ESP8.0的液压控制单元。制动系统采用金杯客车的制动管路和制动器。整个ESP硬件在环仿真平台搭建在金杯客车上,并对金杯客车的制动管路进行了改造,安装了压力传感器和液压控制单元。



图3 ESP混合仿真试验台外观



图4 上位机、下位机及控制器

图3为ESP混合仿真试验台外观。图4为试验台内部结构。其中，上位机为蓝色方框圈定，连接有显示器。下位机由红色方框圈定所示。控制器cRIO由黄色方框圈定。上位机、下位机与控制器间连接有网线。由图可见，由PXI和cRIO硬件搭建的硬件在环仿真平台的结构非常紧凑，占地面积小。

#### 4、ESP硬件在环仿真平台软件设计

ESP硬件在环仿真平台软件分为三个部分：上位机程序、下位机程序、控制器程序。图形化编程语言LabVIEW的独特优势为系统软件的快速开发提供了极大的推动力：

- 1) 提供的丰富图形控件，以及图形化编程方法，是开发过程形象生动起来；
- 2) 采用的数据流模型能够自动实现多线程并行处理并行处理，大大缩减了软件开发周期；
- 3) 使用状态机设计模式，使各部分程序便于进行升级和维护；
- 4) 易于使用的网络共享变量简化了网络编程部分的开发工作，极快地实现了三部分程序的数据交互交互数据所需的开发工作；
- 5) 安装了驱动NI-DAQmx后，丰富的范例程序极具参考价值，易于实现所需的数据采集和数据输出功能，确保了下位机和控制器之间的可靠数据交互。

ESP硬件在环仿真平台的软件整体流程见图5。

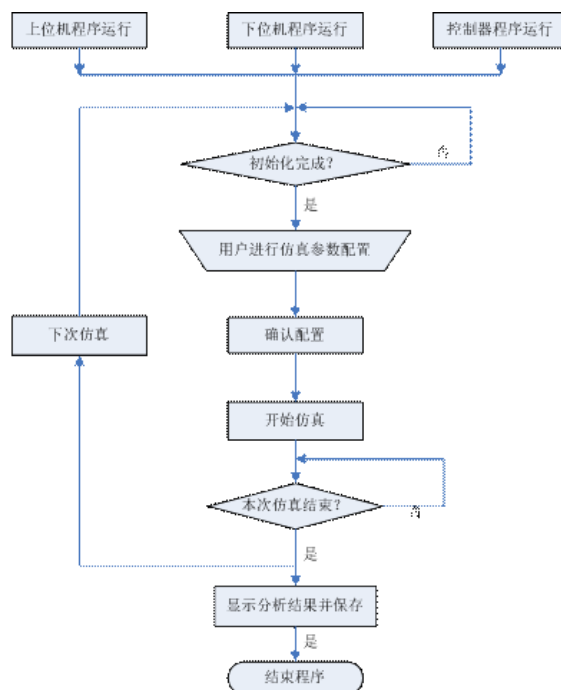


图5 ESP硬件在环仿真平台的软件整体流程

1 上位机监控程序

- 1) 上位机监控程序主要分为两个部分，仿真过程监控和查看仿真数据。仿真过程监控，包括参数调用、仿真控制、参数实时监控、仿真过程中驾驶员输入等功能。并且可以对仿真模式、换挡策略、仿真时间、初始状态、路面附着等进行配置。方便灵活地实现各种情况的仿真。仿真过程监控界面见图6。
- 2) 查看仿真数据部分，可以观察对比仿真数据、仿真过程中车辆运动回放、数据保存和调用。查看仿真数据界面见图7。

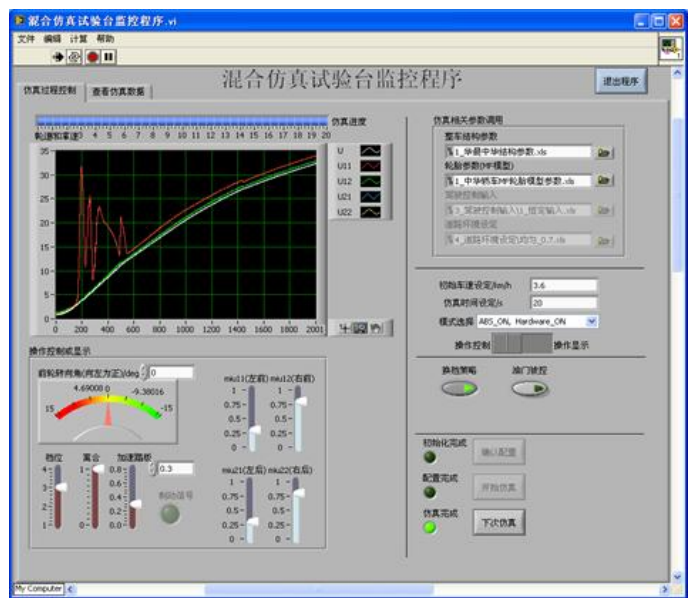


图6 仿真过程控制 界面

图6所示曲线为对开 路面驱动防滑系统起 作用的情况下的仿真 过程。

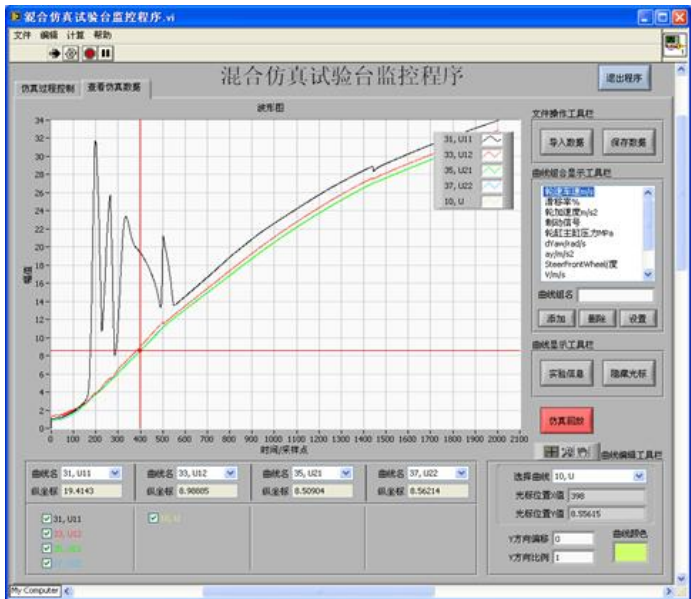


图7 查看仿真数据 界面

图7所示的曲线为对 开路面驱动防滑系统 起作用的情况下的轮 车速曲线。可以观 察仿真过程中70个 参数的变化曲线。可 以保存和调用仿真数 据，可以通过点击右 下方的“仿真回放” 按钮，图像化显示车 辆运行轨迹。

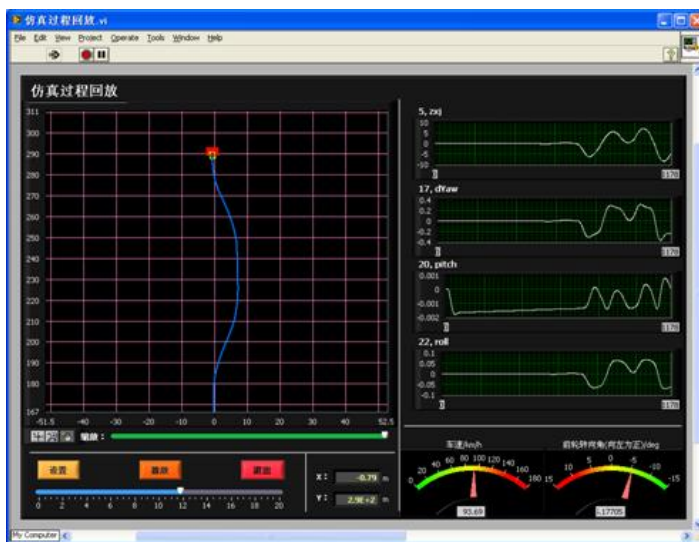


图8仿真过程回放界面

图8是一个双移线的 仿真回放，记录实车 试验的转向角的信息，将这些信息在仿 真过程中，按照实际 的时间间隔输入给系 统。仿真得到车辆的 响应情况。

## 2 下位机仿真程序

下位机仿真程序在 PXI平台上运行，包括整车模型运算，监测驾驶输入，端口 输入输出,仿真数据 记录四个部分。在仿 真过程中，下位机以 1ms为周期通过数 据采集卡采集主缸和 4个轮缸的压力信号，从而计算车辆受力，得到车辆运动状态。并将状态参数通 过数据采集卡输出给 控制器。同时，下位 机将车辆运动状态参 数以10ms为周期 将数据保存在下位机 内存中，仿真结束后 上传到上位机，并且 以10ms为周期不 断检测上位机所发出 的控制信号，比如转 向信号、换挡信号、 油门信号等。正是由于LabVIEW采 用数据流模型，能自 动实现多线程的并行 处理，使得复杂的 功能得以快速实现。

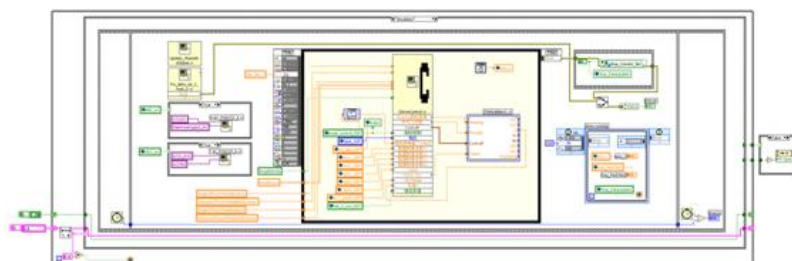


图9 下位机程序框 图

## 3 控制器程序

控制器上运行ESP 核心控制算法。控制器通过接收各种传感器的信号，判断车辆 状态是否为危险工 况，如果检测到危 险，就会输出控制指 令给执行器，通过电 机和电磁阀的动作来 对制动系统进行主动 干预，同时通过 CAN总线发送指令 给发动机系统，控制 车辆驱动，从而化解 危机。控制器首先采 用NI公司的 cRIO硬件平台作为快速原型，验证合 格的算法将移植到 我们开发的ESP控 制器上。

## 5、ESP硬件在环 仿真平台精度验证

比对ESP硬件在环 仿真平台的仿真结果 与实车试验结果，可 以统计得出仿真平台 的测试精度。在 ESP硬件在环仿真 平台上可以进行多种 仿真测试，例包括：

- 1) 通过蛇形试验检验车辆 转向响应的仿真精 度；
- 2) 通过稳态转向试验验证 车辆转向特性的仿 真精度
- 3) 通过双移线试验检测仿 真横向精度；
- 4) 通过ABS试验检测仿 真纵向精度等。

以ABS试验为例，进行了中华尊驰轿车 在低附、强制动， ABS作用下的 ESP硬件在环仿 真。低附ABS起作 用时轮速仿真结果见 图10，图中红色和 蓝色曲线为两后轮轮 速的实车试验数据， 绿色和黑色曲线为两 后轮轮速的仿真数 据。仿真结果与实车 试验数据相比得出： 纵向加速度的偏差在 5%以内，对各制动 轮的的压力干预体现 出完全相同的特征。表 明仿真结果与实车试 验结果基本吻合，仿 真平台精度能够满足 动力学分析要求，能 够用于指导ESP控 制算法的研发。

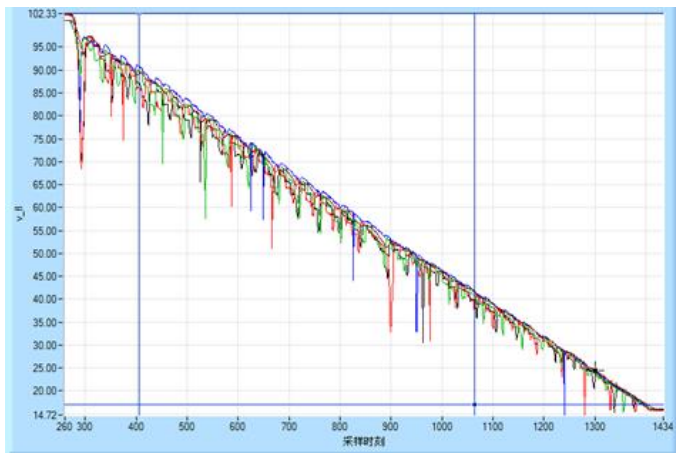


图10 低附ABS 起作用时轮速仿真结果

## 结论

依托NI公司的强大的图形化编程语言 LabVIEW，结合先进的PXI和 cRIO硬件平台，我们在很短的时间内快速搭建完成了可靠的ESP硬件在环仿真平台。该平台可以将ESP控制器放在仿真回路中，方便对控制器中运行的ESP核心控制算法进行高精度的测试。ESP硬件在环仿真平台的快速搭建完成，极大地加快了ESP控制算法的开发速度，缩短了算法的开发周期。

如果您有任何问题，请留言给NI工程师，我们会尽快给您回电！

更多获奖论文请浏览 [www.ni.com/china/papercontest](http://www.ni.com/china/papercontest)

## 作者信息:

李红志

清华大学



ESP混合仿真试验台外观

## 下一步

[进一步学习硬件在环仿真](#)

[进一步学习快速原型设计](#)

[了解汽车行业的更多应用](#)

## 法律条款

本教程由 National Instruments 公司（简称“NI”）开发。尽管 National Instruments 可为该程序提供技术支持，但是该指南的内容并非完全通过测试和验证，NI不以任何方式保证其质量，也不保证相关产品或驱动程序的新版本出现时继续为其提供技术支持。本教程仅以其“现状”向用户提供，教程没有任何担保。教程使用受 ni.com网站上《使用条款》的约束。（<http://ni.com/legal/termsofuse/unitedstates/us/>）