

发动机控制器硬件在回路 (HIL) 测试系统



图1.1 汽车故障 分布图

"系统方案结合了 NI平台和恒润科技 的软硬件设备，借助灵活开放的NI虚拟 仪器，以及恒润科技 在汽车行业的丰富经验，使系统更好的满 足汽车行业HIL测 试的实际需求，在保 证测试系统的稳定 性、可靠性的同时， 大大缩短了HIL测 试系统的开发周 期。"

- 张 富丽,北 京经纬恒润科技有 限公 司

The Challenge:

构建发动机控制器 (EMS) 硬件在回路 (HIL) 测试系统，需要在仿真整车 运行环境的前提下， 监测EMS在各种工 况下的工作状态， 并且能够通过测试工具 实现系统的自动化测 试。因此，EMS HIL测试系统最为 关键的内容包括： 准确模拟整车和发动 机的各种运行工况， 模拟EMS所需的各 种传感器信号，采集 EMS的控制信号， 模拟整车网络中的 其它控制节点，并 编写可自动运行的 测试用例程序。

The Solution:

EMS HIL测试 系统搭建了一个完整 的"虚拟车辆"测试 环境，能够在方案设 计阶段对EMS产品 技术方案进行验证， 并且利用NI TestStand 软件实现EMS的自 动化测试。本系统有 如下优点：测试环境 配置灵活、测试成本 较低、人力投入较 少、测试周期较短 等。

Author (s):
张 富丽 - 北京 经纬恒润科技有 限公 司

一、HIL测试系统 方案概述

1、HIL测试系 统方案优势

随着科技日益创 新，汽车技术的革新 主要来自汽车电子技 术的迅速发展，汽车 电子电气系统相关产 品和技术越来越多的 应用到实际的量产车 型中。同时，从市场 反馈来看，汽车故障 较多发生在电子电气 系统相关器件 (如图 1.1所示)，而解 决这些故障的根本手 段除了在设计阶段制 定科学合理的电子电 气系统设计方案外， 必须对系统方案进行 验证测试，因此对系 统方案进行硬件在回 路 (HIL) 测试成 为系统方案验证阶段 的必要工作。



图1.1 汽车故障 分布图

HIL 测试系统方 案的优势特点：

- 可实现自动化 测试、并生成测试报 告，重复性强；
- 集成动态模 型，可进行闭环实时 控制；
- 可测量所有电 气信号，包括总线信 号：CAN和LIN 总线；
- 可分阶段进行 系统测试，对未开发 完毕的ECU进行总 线仿真；

减少测试时 间，降低测试成本：

- 可在多个平台 中进行切换
- 多个ECU不 同组合的测试
- 同一个ECU 不同型号的测试

可通过自动化 测试，减少测试时 间，降低人员投入
具备丰富的测 试功能：
可测试单个控 制器的控制功能
可对整车网络 进行测试
可模拟车辆的 复杂工况
可模拟各种类 型的电气故障
测试功能易于 扩展
可方便连接测 试工具：如标定和诊 断工具等

2、EMS HIL 测试系统原理

如下图1.2基于 四缸高压共轨柴油机 EMS HIL测试 系统工作原理图 所示，试验管理软件运 行在PC机环境下， 车辆仿真模型运行在 HIL系统硬件实时 控制器上，通过 I/O模型直接控制 I/O接口，I/O 接口与信号调理、故 障仿真板卡在硬件平 台上集成，最终实现 与EMS相连。I/O接口与信号调 理硬件配合，能够仿 真各种传感器和执行 器，监测执行器工作 状态并回传给车辆模 型，同时也能够模拟 各种硬件故障。从 而，HIL测试系统 与被测EMS组成 一个虚拟的整车试验 环境，通过自动测试工 具控制整套系统实现 各种工况的测试，生 成测试报告。
EMS开发者可基 于此平台分析、评 估、优化EMS控制 策略，并对优化后的 EMS进行重新测试。

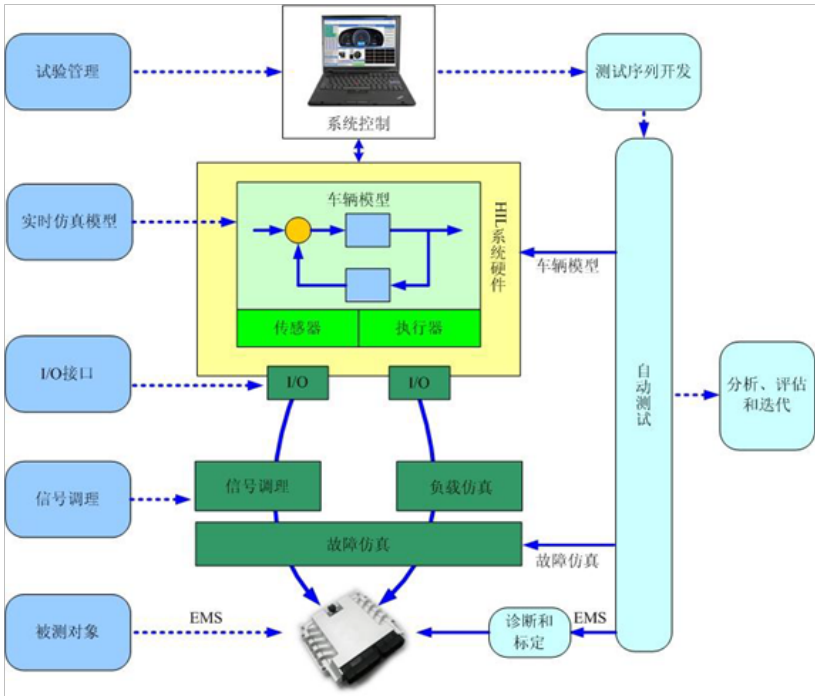


图1.2 EMS HIL测试系统工作 原理图

二、EMS HIL 测试系统设计与实现

如下图2.1 EMS HIL测试 系统结构图所示，EMS HIL测试 系统是由车辆模型、HIL硬件、试验管 理软件和EMS控制 器四部分组成，以此 搭建了一个完整的“虚拟车辆”测试环 境。在此测试环境 下，对EMS设计 方案在其设计阶段进行 验证，并且利用 TestStand 软件实现自动化测 试。



图2.1 EMS HIL测试系统结构 图

搭建本测试系统需要 完成以下四部分工 作：硬件平台设计、 模型设计、系统闭环 测试和系统自动测 试。下文将针对各部 分工作进行详细介 绍：

1、硬件平台设计

EMS HIL测 试系统硬件仿真平台 主要功能：提供车辆 模型的实时运行环 境，模拟EMS所需 的各种传感器信号， 采集并监测控制器和 执行器信号，模拟 CAN网络中的其它 节点，对EMS和 NI设备信号提供驱 动、放大、滤波、保 护、特殊信号的处理 等功能。

如图2.2 HIL 测试系统硬件平台示 意图所示，硬件组成 主要包括：PXI机 箱和板卡、信号调理 模块、故障注入板 卡、内置的断线测试 盒、真实负载箱、电 源切换板和电流采集 模块、车载电源模拟 器、电源管理模块和 机柜等。

1.1、NI PXI机箱和板卡

PXI机箱和板卡 主要包括：**PXI机箱**、PXI嵌入式实时 控制器、R系列 FPGA板卡、FlexRIO系列 FPGA板卡、DAQ板卡和CAN 卡。

PXI机箱用于放 置PXI嵌入式实时 控制器和PXI板 卡，其中PXI嵌 入式实时控制器用于 运行车辆放置模型和控 制PXI板卡，而 PXI板卡主要功能 包括：数字I/O、模拟I/O、PWM I/O、输 出电阻控制协议、模 拟曲轴、凸轮轴等特 殊传感器、采集喷油 参数、收发CAN报 文等。

PXI机箱、嵌 入式实时控制器和板 卡组成一个实时硬件 系统，通过PXI板 卡的I/O接口接收 经过调理的EMS信 号，并将信号传输给 车辆模型，在车辆模 型运算后再由PXI 板卡的I/O输出各 种传感器信号，信号 经过调理和故障仿真 后传输给EMS，从 而形成一个闭环的实 时系统。

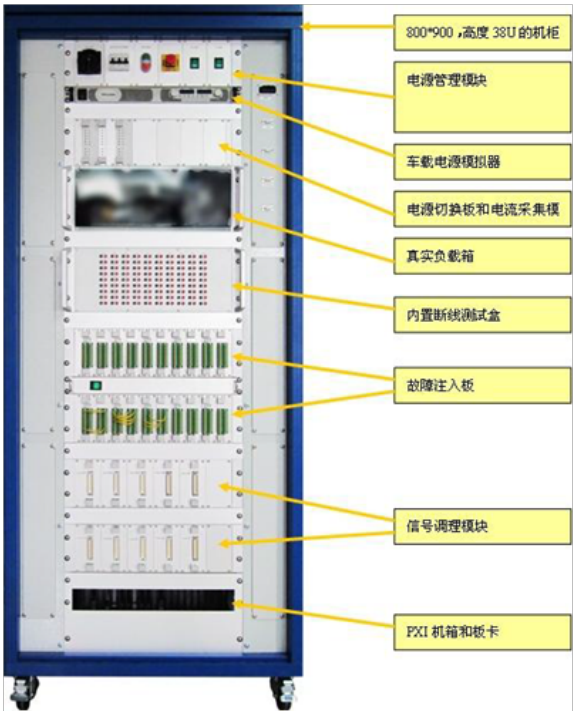


图2.2 HIL测 试系统硬件平台示意 图

1.2、信号调理模 块

信号调理模块主要 功能：

- 通过适配板和 信号调理载板，实现 对PXI板卡硬件资 源的分配，把资源按 照信号类型进行分 类；
- 通过信号调理 载板上的跳线选择、 配置地线，对地线进 行集中管理，方便接 线抑制干扰；
- 通过信号调理 载板，配置需要调理 的通道，在信号调理 模块上对信号进行调 理，实现信号驱动、 放大、滤波、保护等 功能；
- 特殊信号处 理，如，电流型轮速 信号输出调理、电阻 模拟等；

1.3、故障注入 板

根据EMS的实际 需求，对故障注入模 块中的通道数量进行 分配，每个通道可以 模拟对电源短路、对 地短路、开路故障状 态、任意两管脚间短 路等故障。板卡由 恒润科技开 发的软件控制，该软 件操作简单，支持自 动化测试，通过 RS232发送指令 到板卡上的单片机（MCU），MCU 根据指令控制继电器 动作，执行相应的故 障模式。

1.4、内置断线 测试盒

断线测试盒主要功 能：测量EMS和 HIL设备之间的所 有信号、手动制造 EMS故障等。

1.5、真实负载 箱

真实负载箱采用抽 拉式结构，内置连接 EMS的EDAC端 子台和喷油器等客户 所指定的真实负载。

1.6、电源切换 板和电流采集模块

电源切换板：仿真 EMS的上电过程。

电流采集板：将电 流信号（例如高压共 轨发动机喷油器的驱 动信号）转换成电压 信号便于NI板卡采 集。

1.7、车载电源 模拟器

车载电源模拟器与 电源切换板结合使 用，给EMS供电， 并且可以根据EMS 功率消耗选取相应 的程控电源。此外，通 过HIL 测试系统 可以对其中程控电源 的输出电压和输出电 流的限值进行控制和 监测。

1.8、电源管理 模块

电源管理模块：主 要实现对HIL硬件 平台的电源进行控 制、分配、保护等。

1.9、机柜

机柜：分层存放各 类硬件模块。

2、模型设计

为了满足对EMS 控制器的HIL测试 需求，需要根据客户 提供的车辆参数搭建 车辆模型，并进行参 数化，增加I/O模 型、CAN报文集成 等工作。因此，本方 案模型开发的工作包 括：搭建模型并对模 型进行参数化、 I/O模型设计、 CAN报文的I/O 模型设计。

2.1、车辆模型 设计

本方案使用四缸高 压共轨柴油机模型， 包含以下子系统：

气路模块：中 冷器、气路模型、增 压器

油路模块：油 轨、高压泵、压力控 制阀、喷油器、油箱

冷却模块：催 化器

排气系统

气缸：扭矩输 出、摩擦扭矩

环境模块：驾 驶员、测功机模型

软件ECU：发 动机ECU

该模型使用 Matlab/Simulink 进行开发，包含了详 细的气路、油路和气 缸等子系统模型，满 足与发动机控制器的 I/O接口要求。

2.2、I/O模 型设计

模型I/O的主要 功能：数字I/O、 模拟I/O、 PWM I/O、电 阻控制协议、模拟曲 轴、凸轮轴等特殊传 感器、采集喷油参数 等。

在EMS HIL 测试系统中，需要对 I/O模型（除模拟 I/O外）进行重新 开发，在开发过程 中，需要先在NI FPGA上进行功能 开发，在开环验证功 能满足客户的需求 后，将I/O模型添 加到 Matlab/Simulink 模型中，最后通过 NI VeriStand 导入模型，并将 FPGA与I/O模 型关联。

I/O模型设计最 为核心的内容是，基 于NI FPGA进 行功能开发。分为两 部分内容：针对 NI FlexRIO板卡 的适配板卡的硬件开 发，以及FPGA程 序的开发。其中，硬 件开发主要是针对 NI FlexRIO板卡 的IO接口扩展高速 的A/D、D/A和 数字I/O。FPGA程序主要实 现的是特殊传感器模 拟、喷油参数采集和 其他I/O模型的功 能。

如图2.3所示是 基于NI FPGA 的程序开发流程。由 图可知，I/O模型 的开发流程为：首 先，在NI VeriStand FPGA Interface 模板中编程，程序包 含FPGA函数和 vhdI程序代码 等；其次，通过 FPGA编译器编译 此程序，生成二进制 文件；再次，在文本 编辑器中，编辑针对 二进制文件的配置文 件；再在NI VeriStand 中添加RIO设备， 调用二进制文件的配 置文件；最后，通过 运行 VeriStand 工程将程序下载到 FPGA中。

采用在NI VeriStand FPGA Interface 中开发FPGA程序 的开发方式，不仅 能够实现程序的离线 仿真，而且能够达到 FPGA与车辆模型 传递数据的目的。



图2.3 基于 NI FPGA的程 序开发流程

上述模型开发模式 不仅能够保证系统的灵 活性和稳定性，借助 开放的NI VeriStand架构也可以大幅降低 时间成本和人力成 本。

2.3、CAN报 文I/O模型设计

基于EMS的 CAN通讯协议（ CAN的数据库 dbc文件 ），对 CAN通道进行相应 的配置，正确发送 EMS所需的CAN 信号，监测EMS发 出的CAN信号，并 将CAN的发送和接收的信号引入模型。

3、系统闭环测试

在完成上述设计工 作后，即可对HIL 测试系统进行闭环调 试，系统闭环测试的 工作内容包括： VeriStand工程搭建和系统闭环 调试。

VeriStand作为试验管理软件， 是HIL系统闭环调 试必不可少的工具。在搭建“虚拟车辆” 测试环境的过程中， 主要功能是：集成车 辆模型、加载CAN 通道、加载DAQ设 备、加载FPGA设 备、将I/O模型的 接口与硬件通道关 联、下载集成好的模 型、监测I/O接口 和CAN信息、监测 EMS信号、实现模 型的在线参数修改 等。

Veristand 灵活、开放且高兼容 的架构，使得我们 能以更高效的方式 搭建 复杂的系统测试 环境，尤其适合对于实 时性强、且自定义 设计要求比较高的 应用 情况。

3.1、 VeriStand 工程搭建

VeriStand 工程搭建内容：系统 定义文件的配置、界 面的搭建。其中，系 统定义文件的配置主 要包括：模型集成、 DAQ集成、RIO 集成、CAN集成、 I/O模型与硬件和 CAN通道关联。

为了更好的满足汽车HIL测试的实际需求，恒润科技对 VeriStand 界面中的控件进行了重新开发，增加汽车仪表、档位控制、点火钥匙等控件，并优化重组了其它控件。界面的搭建主要包含：EMS功能测试界面（如图2.4所示）、CAN和 I/O监测界面。



图2.4 EMS功能测试界面

3.2、系统闭环调试

在 VeriStand 工程搭建好之后，将 PC机通过网线跟 PXI嵌入式实时控制器连接，运行 VeriStand 工程即可将车辆仿真模型下载到PXI实时控制器中。此时，HIL硬件平台与EMS组成一个“虚拟车辆”的运行环境，通过 VeriStand 界面进行“虚拟车辆”的控制、车辆仿真模型的校准等工作，直到达到EMS动态控制模型的扭矩、转速、轨压等参数与台架上的实验数据近似（近似的程度根据客户需求而定）。

4、HIL测试系统自动化测试

自动化测试优点：更方便的实施重复性测试和回归测试；可以执行一些手工测试困难或不可能进行的测试；能够保证测试结果的一致性，并可反复多次测试；能够在一定程度上避免失误或误操作等。
在完成模型的闭环调试后，使用NI TestStand 搭建自动测试用例。由于测试序列的自定义要求很高，一方面可以导入已有的测试用例，提高效率；同时又需根据不同工况和具体需求，加入各种新的自定义测试。为此，恒润科技借助 TestStand 的基础上专门开发了针对汽车行业HIL系统测试的自动化测试用例库。如图 2.5恒润科技自动化测试用例库所示，TestBaseLib 为自动测试基础库，EFILib为故障注入的自动测试包（该测试包只有系统中引入故障注入功能时才会使用）。

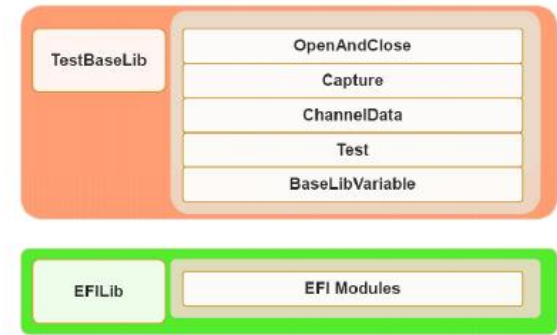


图2.5 恒润科技 自动化测试用例库

最后，在执行自定义的测试序列之后，NI TestStand 会自动生成完整的测试报告。

三、方案总结

本系统是以NI的软件和硬件设备为基础，结合恒润科技开发的信号调理模块、故障注入模块和车辆仿真模型，搭建的一套针对四缸高压共轨柴油机EMS的HIL测试系统，它能够模拟EMS所需的各种传感器信号，采集EMS的控制信号，模拟CAN网络中的其它节点。具备以下技术优势：

- 支持自动化测试、测试报告生成，测试用例可重复性强；
- 集成了动态模型，可进行闭环实时控制；
- 可测量EMS所有的电气信号；
- 可分阶段进行系统测试，对未开发完毕的ECU进行总线仿真；
- 能在不同ECU变型结构之间快速切换；
- 减少测试时间、降低测试成本；
- 具有丰富的测试功能。

NI硬件平台的稳定性以及 VeriStand、TestStand 软件系统的开放灵活性提高了HIL系统开发的效率，同时 NI长期专业的技术支持也帮助汽车背景的工程师在开发 HIL等复杂电子电气系统时游刃有余，只需专注于汽车领域技术，简化系统开发。

因此，基于NI平台的HIL测试系统解决方案不仅能够缩短EMS控制器的产品开发周期，而且更能够在设计阶段对EMS的功能进行全面的测试和验证，在汽车行业众多整车厂、零部件商的车型和产品研发过程中得到广泛的应用。

Author Information:
张富丽
北京经纬恒润科技有限公司



图1.1 汽车故障 分布图

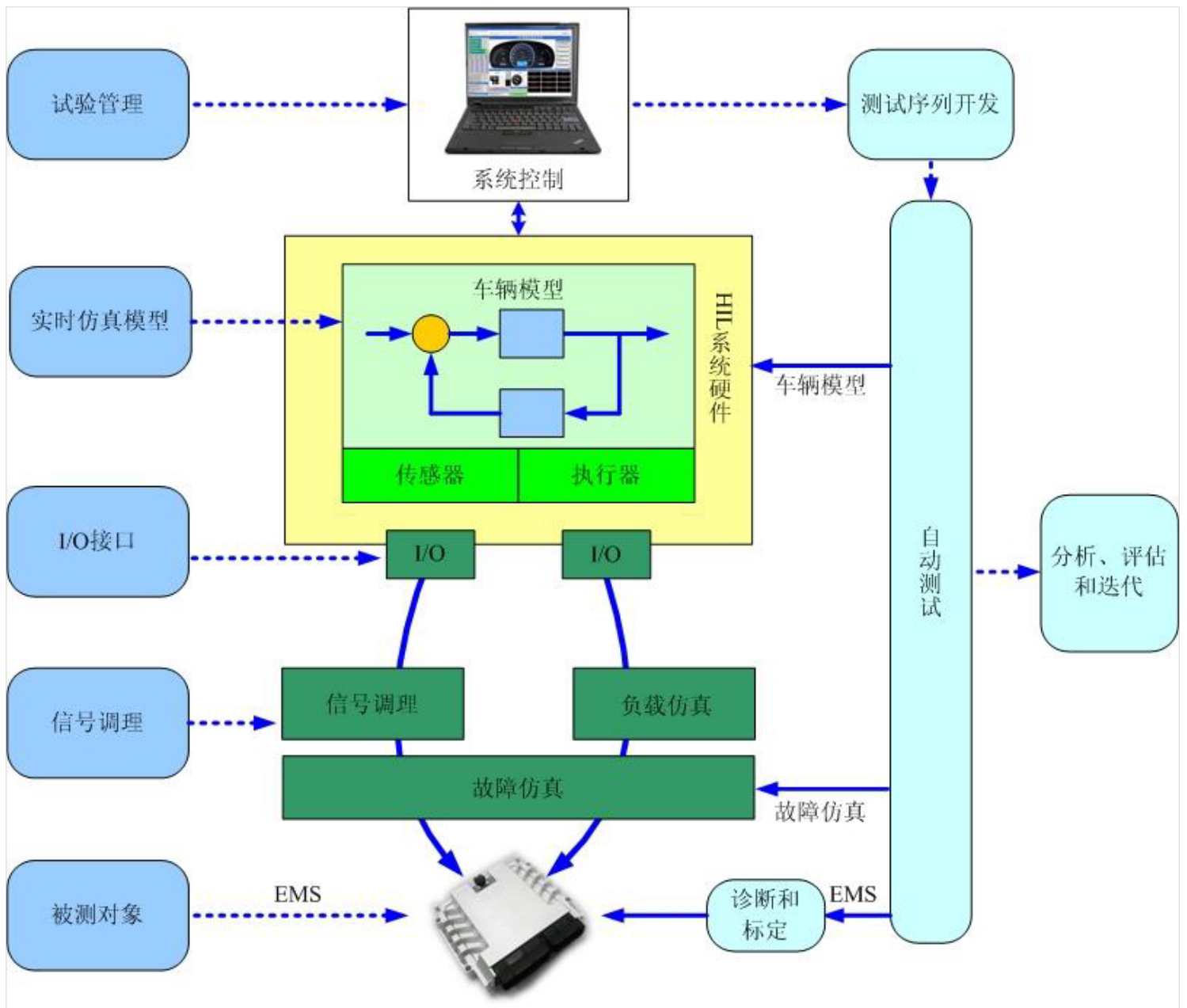


图1.2 EMS HIL测试系统工作 原理图



图2.1 EMS HIL测试系统结构图

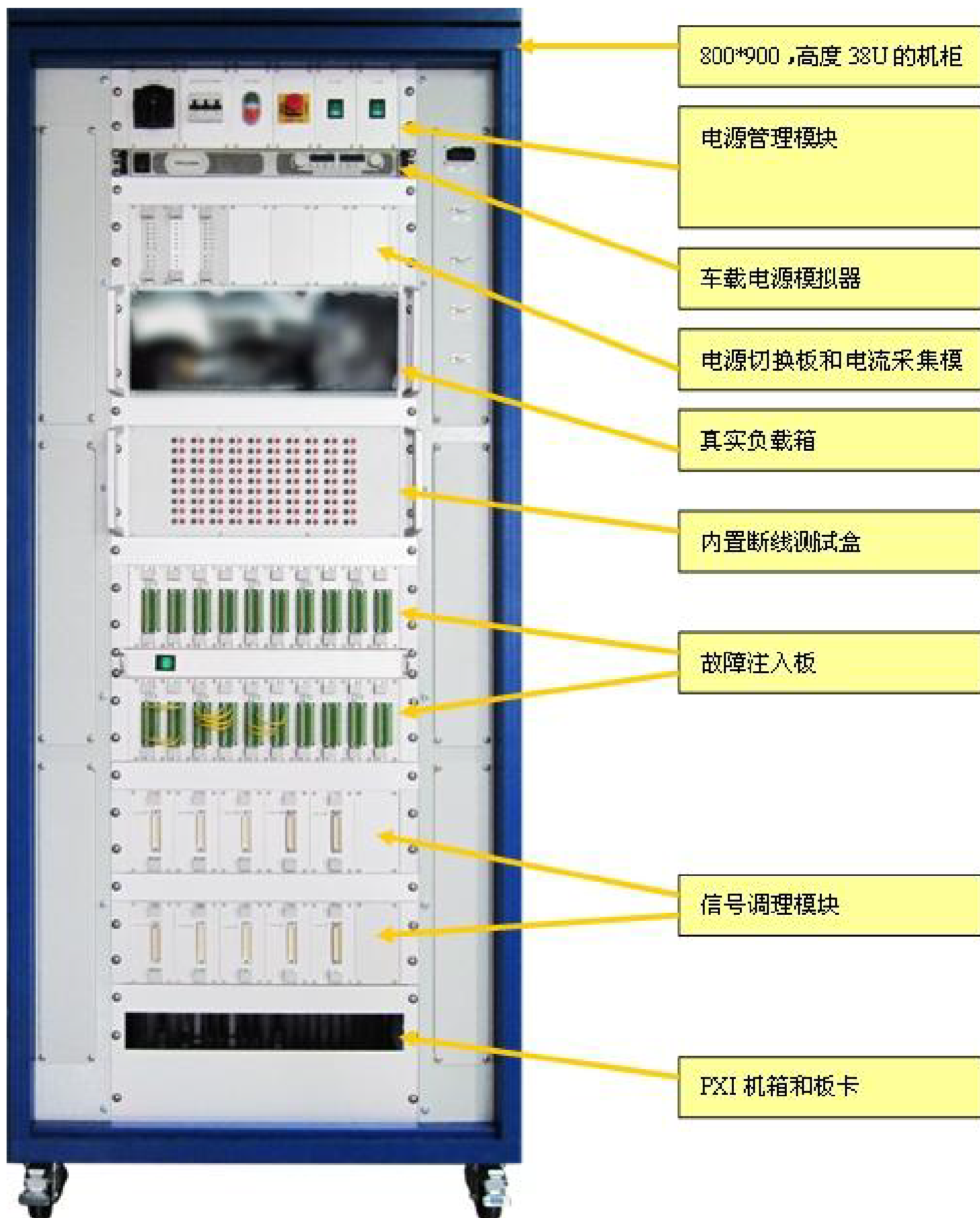
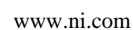
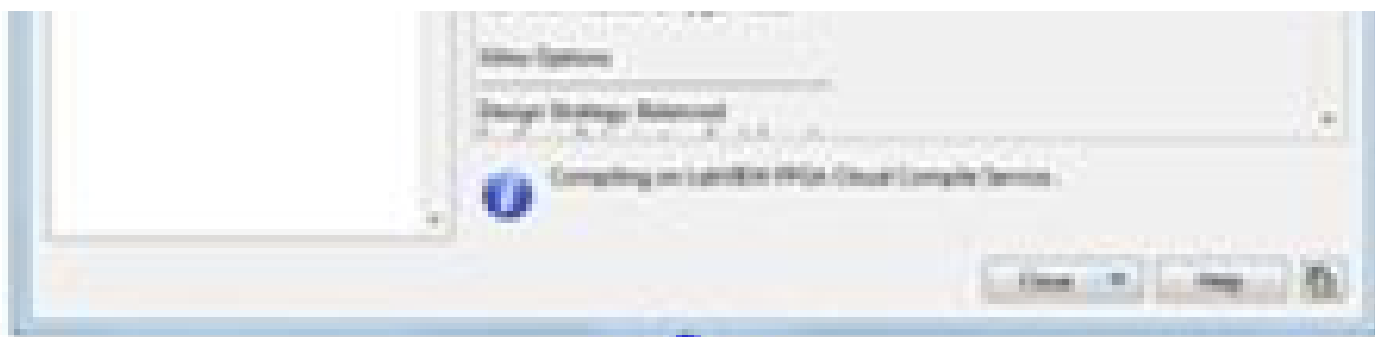
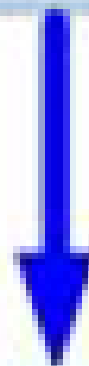


图2.2 HIL测试系统硬件平台示意图





编写 FPGA Configuration File



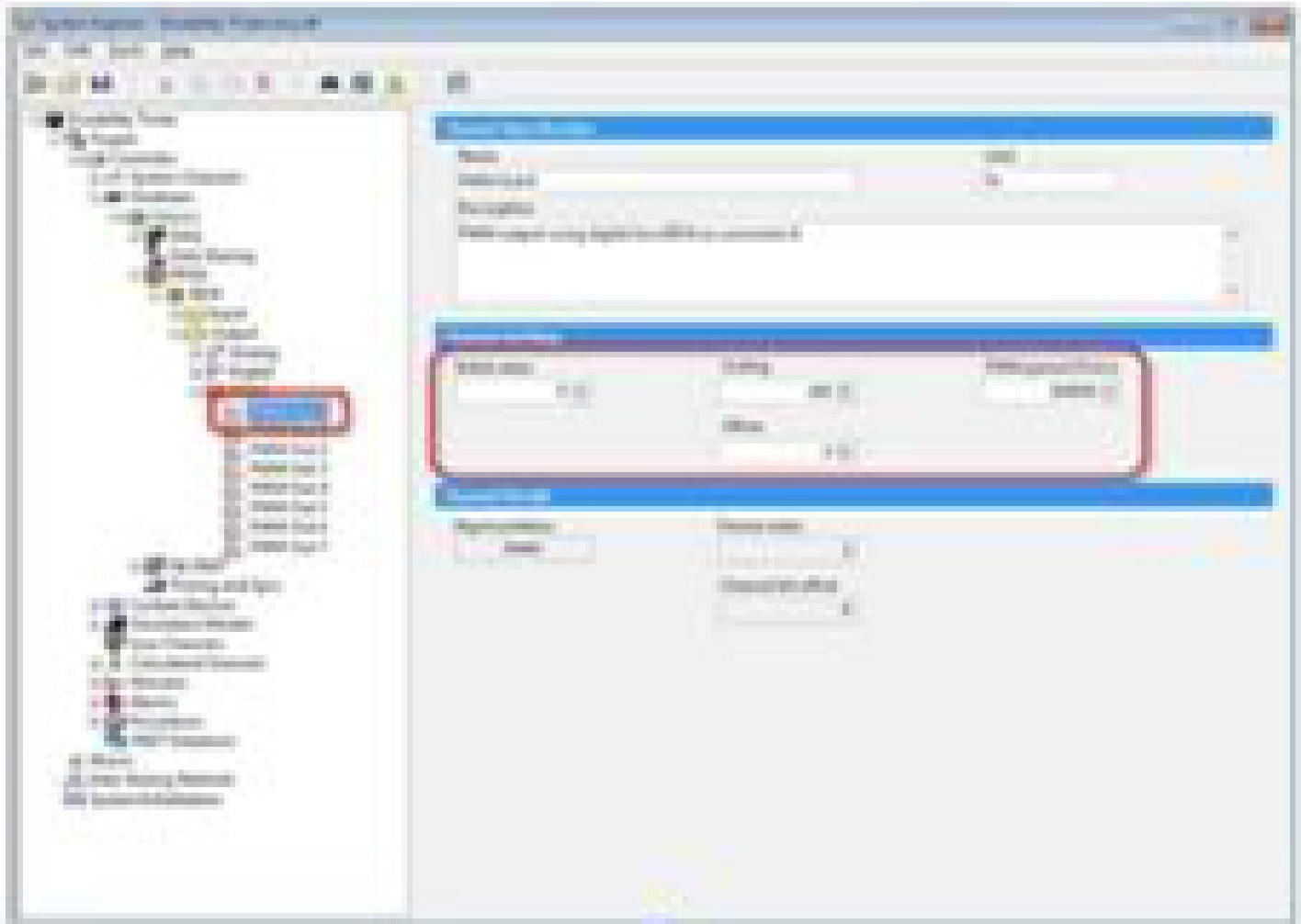
配置System Definition File的

DEVELOPMENT PLATFORM

RIO



NI VeriStand



下载到FPGA板卡

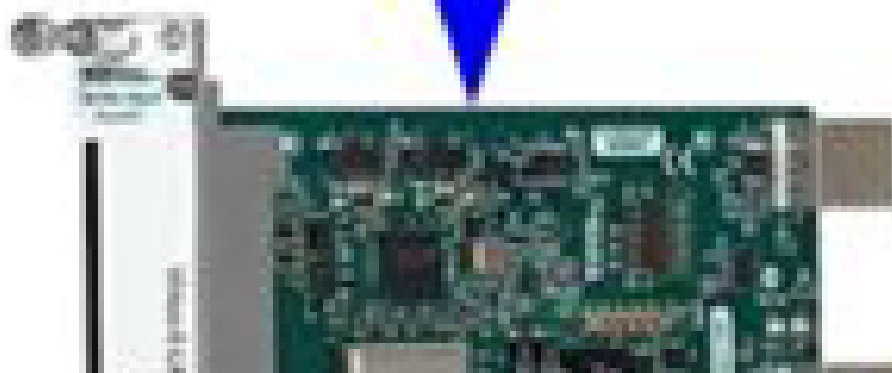




图2.3 基于 NI FPGA 的程 序开发流程



图2.4 EMS功 能测试界面

Legal

This case study (this "case study") was developed by a National Instruments ("NI") customer. THIS CASE STUDY IS PROVIDED "AS IS" WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND AND SUBJECT TO CERTAIN RESTRICTIONS AS MORE SPECIFICALLY SET FORTH IN NI.COM'S TERMS OF USE (<http://ni.com/legal/termsofuse/unitedstates/us/>).