

基于模型的汽车电控系统设计

陈虹^{a,b}, 褚洪庆^b, 刘奇芳^b, 高炳钊^a

(吉林大学 a. 汽车仿真与控制国家重点实验室; b. 控制科学与工程系, 长春 130025)



摘要: 汽车智能化和网联化使电控系统开发流程变得日益复杂, 如何提高控制性能并降低开发成本已经成为汽车电控系统开发亟待解决的关键问题。在汽车电控系统开发过程中, 由于领域和分工的不同, 系统设计和控制算法被分离研究, 使得先进控制算法无法在汽车系统中发挥实际作用。基于模型的控制系统设计为解决这些问题提供了有效手段。结合缸内直喷汽油机燃油共轨控制系统的开发, 给出了从工程控制需求分析、性能描述、系统设计到模型建立、性能验证与评价的基于模型的具体设计过程, 同时也充分说明了采用这种设计流程可以实现控制算法、系统设计和工程应用的有效结合。

关键词: 控制系统设计; 汽车控制; 基于模型的设计; V 流程; 燃油共轨系统

中图分类号: TP29

文献标识码: A

Model-based Design for Automotive Control Systems

CHEN Hong^{a,b}, CHU Hong-qing^b, LIU Qi-fang^b, GAO Bing-zhao^a

(a. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control; b. Department of Control Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: The increased intelligence and networkization of automotive electronic systems makes the task of control system design more difficult. How to improve the control performance and reduce the development cost has become a key problem to be solved urgently. Due to the division of labor in the development process of automotive control systems, control algorithm design and system design are studied separately, which will lead to failures for advanced control algorithms to play a practical role in automotive systems. Model-based design has been highly expected as an effective means to solve the issue. Based on the system design for rail pressure control, the specific process of model-based design is presented in this paper, such as requirement analysis, performance specification, control system design, model establishment, performance verification and evaluation. It is fully illustrated that the effective integration of control, systems and engineering can be realized by using this design process.

Key words: Control system design; automotive system control; model-based design; “V” model; fuel rail injection system

1 引言

随着汽车智能化和网联化进程的不断推进, 汽车电子占整车制造成本的比例越来越高, 电控系统的开发流程也变得日益复杂, 电子控制技术已经成为汽车性能提升的核心使能技术^[1-2]。据统计, 汽车产品 90% 的创新依靠电子控制技术实现^[3]。尤其是随着节能减排以及动力性和安全性要求的逐渐提高, 新型执行器和动力源被不断引入汽车系统中,

这些新技术的引入增加了控制自由度和动力学耦合的复杂程度, 使得电控系统的设计、标定与验证更加困难^[4-5]。

如何更新升级汽车电控系统而不必增加过于昂贵的投入对汽车电控系统开发流程提出了挑战^[6-8]。为此, 各汽车厂商和研究机构展开了大量研究, 控制领域和汽车工程领域的国际著名期刊都先后推出

收稿日期: 2015-12-07; 修回日期: 2016-03-01

基金项目: 国际(地区)合作与交流项目(61520106008); 973 课题 (2012CB821202); 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(61522307)。

作者简介: 陈虹(1963-), 女, 浙江桐乡人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事预测控制、优化和鲁棒控制、非线性控制及其在汽车机电一体化系统中应用等方面的教学与科研工作。

汽车控制方面的特刊，几乎相关的国际著名学术会议都设立有关汽车控制的分会场。在这些论文和会场上，被反复提到的一项系统开发的核心技术就是基于模型的控制系统设计（MBD, Model-Based Design）^[9-11]。

基于模型的电控系统开发是面向机电一体化产品的现代开发手段^[12-13]，在整个开发过程中以系统模型作为共同的对象，而非物理原型和文本^[14-16]，是解决现在由于领域和分工的不同所形成的将控制算法和系统设计分离对待、分别研究的现状的一个突破口^[17-18]。

其主要的优点包括：缩短产品上市时间，保证产品质量，以及降低成本，减少对物理原型的依赖。基于模型的开发支持系统级和元器件级设计，并且可以在开发的各阶段进行连续测试、仿真和验证^[19-20]，因此它已经逐渐成为满足“安全性、动力性、低成本、低油耗和排放”等汽车电控系统开发要求的有效解决手段，也成为了高等院校工程实践教育的一个重要组成部分^[21]。

2 基于模型的燃油共轨控制系统开发

基于模型的汽车电控系统设计在控制算法理论研究和系统设计之间构建了一个桥梁，有助于控制算法设计回到系统设计中，为实现先进控制算法应用到工程系统中提供了一个通用的设计框架。这种设计思路在加深研究人员对应用系统的理解的同时，也为工程应用人员提供丰富的理论指导。它基于理论推导出参数的选取准则，可以大大减少控制器参数标定工作量。

从系统层面上讲，整个系统的开发进程遵循 V 流程^[22-23]，如图 1 所示。

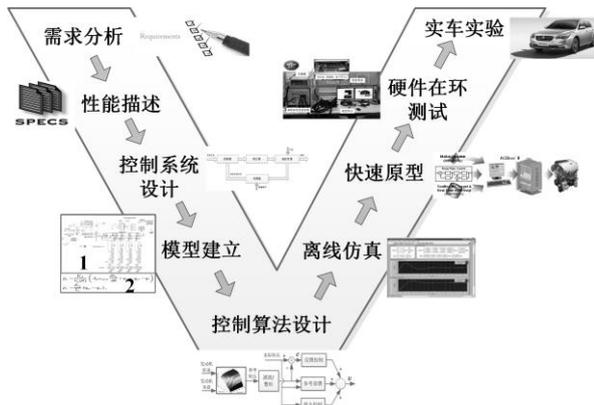


图 1 汽车控制系统设计 V 流程

Fig. 1 V model of automotive control system development

它在总结系统设计步骤间传递关系的同时，展示了系统开发过程需要完成的主要任务。电控系统设计的 V 流程主要包括：需求分析，性能描述，控

制系统设计，模型建立，控制算法设计，离线仿真，快速原型，硬件在环测试，实车实验等，其中，基于模型的思路贯穿整个系统开发进程，即控制需求、设计和验证始终需要立足于系统模型上。实际上，整个顶层的 V 流程的框架下每一步，还需要有很多小的细化的闭环 V 流程支撑。

下面将结合缸内直喷汽油机燃油共轨系统轨压控制问题，阐述了面向工程应用的基于模型的电控系统开发的具体过程。

2.1 来源工程的控制需求分析(需求分析和性能描述)

缸内直喷技术的引入实现了燃油和空气在气缸内的混合，燃油的雾化质量对燃料的充分燃烧影响非常大，提高喷油压力是促进燃油雾化的有效手段。如果喷油压力较低，会导致燃油雾化不良，射程减小，使其不能穿过整个燃烧室，影响了燃油与压缩空气的充分均匀混合(包括混合、蒸发和氧化过程)，进而导致发动机油耗增加。但过高的喷油压力往往会造成喷雾贯穿距离过长，燃油碰壁等情况。而喷油压力则主要取决于共轨管内的压力大小，轨压控制的不精确不仅可能改变期望的喷油量，还会造成燃烧恶化，因此对于缸内直喷发动机而言，轨压控制是一个关键控制问题^[24]。

缸内直喷汽油机的高压共轨喷油系统与柴油机中使用的工作原理基本相似，区别是汽油机的燃油共轨压力要低得多，约为 5 MPa~20 MPa，精确控制的难度更大。为了保证发动机在各复杂工况下都能保持最佳的燃烧状态，需要控制器控制共轨系统中的轨压随着实际工况（发动机转速和负荷）的变化达到相应的目标值，从而保证精确的喷油。轨压控制系统既要保证轨压控制的稳态性能，又要保证轨压的动态性能。工程上对轨压控制系统的性能评价没有直接统一的量化标准，有时轨压控制的好坏由喷油的精度来衡量。根据一些工程设计经验，认为稳态跟踪响应时间小于 100 ms，无超调，跟踪误差在 1 bar 以内，瞬态跟踪误差小于 5 bar 的控制性能满足要求。

2.2 控制系统设计

控制系统的设计离不开对控制需求的分析，不同的控制任务可能对应不同的系统输入和干扰量，因此设计的控制系统也不相同，建模的侧重点也不相同。针对燃油共轨系统，目前应用最为广泛的一种共轨式喷油系统^[25-26]的结构，主要包括低压油泵、高压油泵、共轨管、喷油器、电控单元等组成部分。

整个系统是通过调节位于高压泵入口端低压管

道中的调节阀开度来控制高压泵油量，从而间接地控制共轨压力。

在低压回路中，通过低压泵将油箱内的燃油送到高压泵的入口口，通常来说低压回路中的燃油压力较低，一般只有 3 bar~6 bar。

高压回路中，通过高压泵提高燃油压力并将高压燃油泵到油轨中，高压泵入口口处安装有压力控制阀，压力控制阀对于固定体积的共轨管可以起到调节轨压的作用。

高压泵的出油口处装有单向阀，使得共轨管内的压力不能回流到高压泵内，从而保证共轨压力不会发生大幅度的降低，方便快速地建立轨压。高压泵出油口处还设有限压阀，能够有效的防止出口口处压力过高而损坏相应部件，压力限值一般为 15 MPa~20 MPa。当限压阀打开，燃油流回油箱，出口口处及油轨内的燃油压力会迅速降低。

电控喷油器是共轨系统最终的执行机构，直接安装在共轨管上，高压燃油最终通过喷油器被喷射到燃烧室内参与燃烧，如图 2 所示。

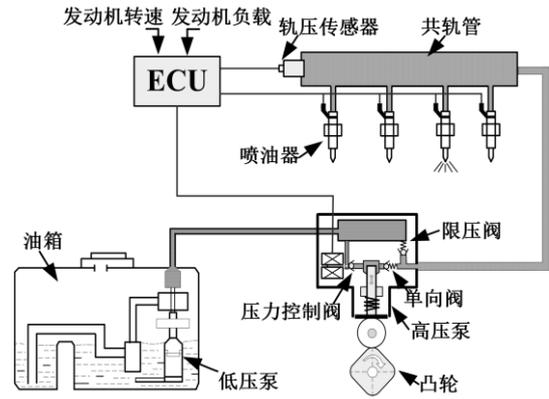


图 2 燃油共轨系统结构示意图
Fig. 2 Structure of the fuel injection system

在设计控制系统方案时，需尽可能多地考虑系统存在的干扰，以达到抑制更多干扰，增强系统鲁棒性的目的，使得系统的控制效果更好。通过分析系统前向通道和反馈通道所受的干扰（压力控制阀的时延特性、燃油泄漏对高压泵压力的干扰以及喷油器喷油量对共轨压力的干扰、传感器测量干扰），可给出燃油共轨系统的控制系统框图，如图 3 所示。

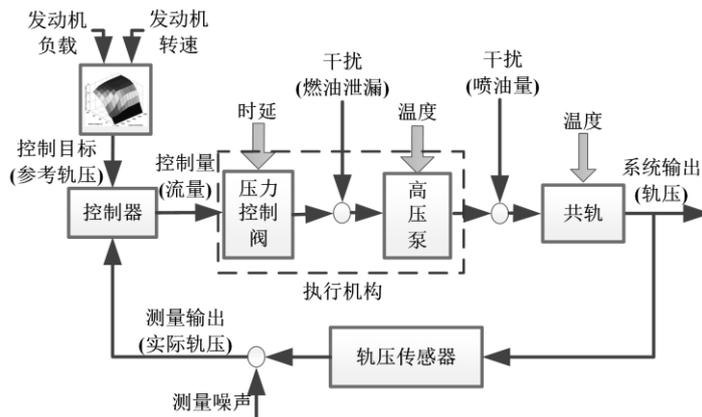


图 3 轨压控制系统设计框图
Fig. 3 Design diagram of the rail pressure control system

从系统设计框图中可以明确系统的被控输出、控制输入、扰动以及中间重要的系统状态，同时能够看出干扰对控制输出性能影响的强弱程度，为后续的建模和算法设计提供依据。

2.3 模型的建立

对于基于模型的设计，建模是一个关键环节。汽车系统的模型可以有很多种形式，从建模方式上来讲可分为物理模型和辨识模型，物理建模可以大大减少数据量，而辨识模型可以保证整个模型不发生大的偏差。然而在很多应用实例中，往往物理模型和辨识模型同时存在于一个“灰箱”模型中，被称为数据和机理混合模型。

在共轨控制系统开发过程中，根据应用的目的需要建立 2 个模型：仿真模型和面向控制的模型。

仿真模型的目的是高保真地再现真实的被控对象，往往比面向控制的模型要复杂。模型的仿真步长一般也比较短，通常小于 1 ms，但是如果考虑液压系统等高度动态系统的动特性，仿真步长甚至会小于 0.1 ms。仿真模型可以用于离线环境下的控制算法测试，也可以与真实电控单元（ECU, Electronic Control Unit）和执行器一起构成硬件在环（HiL, Hardware-in-the-Loop）系统进行电控单元的测试。它的建立一般可借助一些商用开发软件，例如基于 AMESim 软件建立的燃油共轨系统仿真模型，在该模型中，可以模拟非常精细的物理现象，例如，模拟压力控制阀运动，阀芯运动引起的粘性摩擦，喷油器的喷油动作，共轨管内的压力波传播等，如图 4 所示。

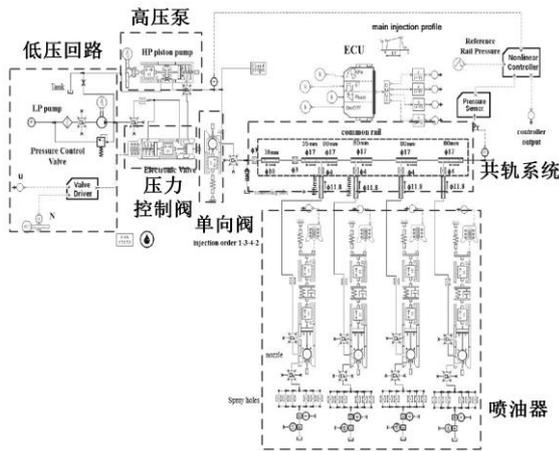


图4 燃油共轨系统 AMESim 仿真模型

Fig.4 Simulation model of the rail pressure control system in AMESim environment

仿真模型搭建完成后，需要校验模型的精度。条件允许的情况下，要与实际车辆数据进行对比：工况一致的前提下，相同输入，比较实车和模型的输出。如果条件不允许，需要验证模型的合理性，合理性验证也需要设定工况，例如，在共轨系统仿真模型的合理性验证中，我们分别选取了压力控制阀小开度和大开度工况进行测试，对建立的主要元件的动态性能进行了分析^[27]。

面向控制的模型主要用于控制器设计，包括通常的传递函数和状态空间方程等。这个模型是仿真模型的高度简化，体现了动态系统的基本模态，忽略了系统动态特性中过于细致的高频部分。同一系统由于控制需求不同，建立的面向控制的模型也可能不同。汽车系统中，简单的系统特性可以通过经验公式进行拟合，但是一些非常复杂的系统特性很难通过具体的公式进行拟合，比如发动机力矩特性、离合器力矩特性等。这种情况下，通常用机理和数据混合的方式进行模型的描述，但这种描述会引入数据 map 表，无疑给基于控制理论的算法设计带来了新的挑战。

燃油共轨系统用于控制器设计的模型应涵盖共轨系统的主要特征，但为了降低控制器的设计和实现难度，模型又不能过于复杂，因此需要对系统进行一定的建模假设。如考虑共轨管有足够的刚度，忽略温度对压强和体积的影响，忽略管内压力波的传播对轨压的影响等。综合考虑影响轨压的主要因素，根据液体弹性模量方程和流体动力学，系统动力学的一种描述形式为

$$\text{高压泵: } \dot{p}_p = \frac{K_f}{V_p(\theta)} (A_p \omega_{rpm} \frac{dh_p}{d\theta} + q_u - q_{pr} - q_0) \quad (1a)$$

$$\text{共轨: } \dot{p}_r = \frac{K_f}{V_r} (q_{pr} - q_{ri}) \quad (1b)$$

式中， p_p 为高压泵腔内的瞬态压力； q_u 为进油口处流量； q_{pr} 为出油口处流量； q_0 为燃油泄漏量； K_f 为有效体积弹性模量； $V_p(\theta)$ 高压泵腔内体积； θ 为凸轮的转角； h_p 为活塞的升程； p_r 为共轨管压力； V_r 为共轨管的容积； q_{ri} 为共轨出油口处的流量； A_p 为进出口处横截面积； c_{pr} 为液体流量系数； ω_{rpm} 为凸轮转速。

需要注意的问题是，由于面向控制的模型高度简化，不可避免的存在模型误差，可能与实际系统有一定距离，所以面向控制的模型校验时应当重点关心系统的主要模态。

2.4 控制算法的设计

在汽车控制单元中，用于控制任务的计算资源还不足40%，为了减低实现成本和计算代价，汽车工程中多采用查表和计算量较小的PI/PID算法。

目前轨压控制系统的工程实现主要采用前馈和基于map的PI/PID反馈控制，通常情况下还要加上特定工况下由转速、温度等原因带来的修正。轨压控制在ECU中通常为10 ms任务，这就要求电控单元有足够快和准确的计算能力，所以过于复杂的算法往往很难实现。

文献[28]关于燃油共轨系统轨压控制提出的三步非线性设计方法，其设计过程分为三步，每一步都有特定的控制目的，其特定的设计过程使得推导简单明了，所得控制律结构层次清晰，该方法已经被用于离合器执行机构位置控制^[29]和发动机电子节气门控制^[30]。

运用三步非线性设计方法推导出的轨压控制律为

$$u = u_s(x) + u_f(x) + f_p(x)e_1 + f_1(x) \int e_1 dt + f_D(x) \dot{e}_1 \quad (2)$$

$$\text{式中, } u_s(x) = -\frac{A_s(x)}{B(x)}, u_f(x, \dot{y}^*, \ddot{y}^*) = \frac{1}{B(x)} \ddot{y}^* - \frac{A(x)}{B(x)} \dot{y}^*$$

$$f_p(x) = \frac{1+k_0+k_1k_2}{B(x)}, f_1(x) = \frac{k_0k_2}{B(x)}, f_D(x) = \frac{k_1+k_2+A(x)}{B(x)}$$

该控制律由稳态控制、参考动态前馈和误差反馈控制 3 部分组成，控制律结构，如图 5 所示。

最重要的是，三步非线性方法的控制律结构和工程采用的结构相似，易于工程人员接受，对于控制理论的工程应用具有实际的指导意义。

当然，控制算法设计不仅仅是设计一个合理的控制器，其实还应当包括基于模型的控制器参数整定规律的获取^[31]，例如基于模型的标定 (MBC, Model-Based Calibration)。对于一个特定的汽车系统，即使控制算法采用传统的 PI/PID，也可以在基

于模型的基础上得到 PI 的参数整定规律，利用这个 规律指导实践，节省标定周期。

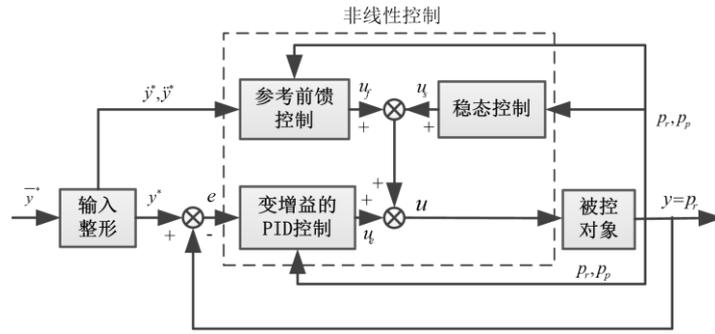


图 5 基于三步法的轨压控制系统框图

Fig. 5 Diagram of the rail pressure control system based on tri-step nonlinear method

三步法轨压控制律(2)面向工程实现的基于模型标定的 PID 增益 map，如图 6 所示。

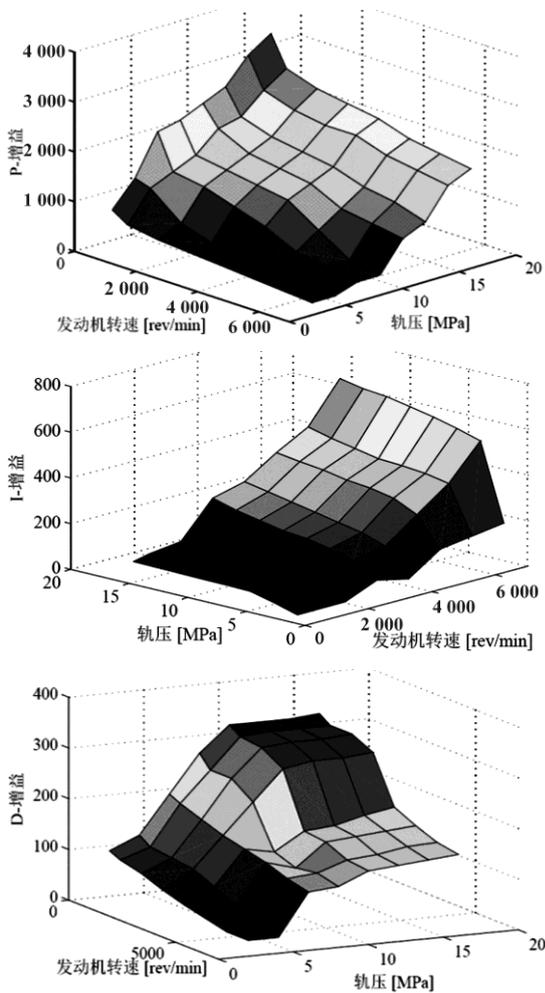


图 6 PID 增益 map

Fig. 6 Gain maps for the PID controller

2.5 控制性能的验证

在汽车系统控制算法开发过程中，不同领域（例如，动力传动、底盘、电子系统）的研发人员需要打破控制和系统分离对待、分别研究的分工隔阂，对问题和方案拥有共同的全面的理解，使得控

制器的测试能够得到较为全面的性能评价，只有这样才能有利于获取合理的控制器设计方案^[32-33]。

控制器性能的评估是整个控制系统设计重要的阶段，因为通过评价控制结果，可以直接反映出系统设计是否满足最初的控制需求和控制性能要求。同时，基于模型的控制系统的测试（尤其是硬件在环测试）可以方便的重复提供各种工况下的测试，也可以提供台架和实车很难实现的极限工况下的测试，降低了测试的成本和周期。

基于模型的轨压控制系统的控制性能测试分为两个阶段，如图 7 所示。

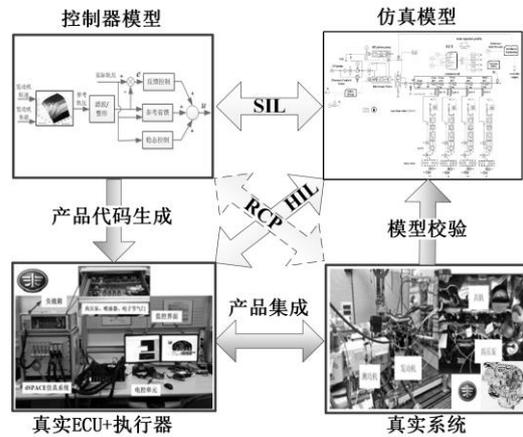


图 7 基于模型的轨压控制系统验证过程

Fig. 7 Various kinds of model-based verification processes in the rail pressure control system

首先是离线验证阶段，在该阶段可以校验控制方案是否合理、控制器实现逻辑是否正确以及功能是否满足要求。离线仿真是基于仿真模型验证控制算法的一种手段，也就是通常意义上的软件在环（SIL, Software-in-the-Loop）测试。这个阶段是将设计的控制器和搭建的仿真模型进行联合，进行控制器参数的调整和控制性能的初步评价。通过联合仿真得到多组控制参数下的控制结果，对比得到较优性能的一组控制参数。需要说明的是，目前这种

获得控制参数的思路可以通过自动调用仿真模型和优化算法实现标定的自动化^[34-36], 以达到降低标定成本和周期的目的。

离线仿真测试之后, 进行的是实时验证阶段。该阶段将设定好的控制器模型转换为实际电控单元 ECU 的软件代码。为了保证转换代码的质量, 使得代码占用硬件资源尽可能少, 转化代码的过程需要考虑代码计算次序对精度影响, 还要对模型的每个参数的范围、精度以及分配字符类型进行定义, 即根据参数范围和精度给每个参数分配不同的硬件资源。代码转化完成后, 将其下载到 ECU 中与仿真模型或半实物仿真模型连接, 进行 ECU 测试。整个过程就是通常所说的硬件在环实验。

需要强调的是这一阶段的测试往往是系统的集成测试。例如, 在轨压控制器的硬件在环实验中, 被控对象仿真模型除了包括完整详细的发动机模型外, 还包括简单的传动系、车辆动力学模型, 同时将电子节气门、高压泵和喷油器等执行机构的实物作为真实负载嵌入到整个系统中, 然后将设计好的轨压控制算法的代码嵌入到发动机控制系统中, 集成编译并下载到真实 ECU, 在整个发动机系统完全运行的状态下完成轨压控制器的测试。

为了进一步对所开发控制系统的可靠性和有效性进行测试, 通常在完成硬件在环实验后进行台架或实车实验验证。多数情况下, 在这一步, 所有控制系统已经运行起来, 而且这一步的测试和标定需要专用的方法和工具。轨压控制系统所采用的发动机台架为一汽技术中心搭建的缸内直喷汽油发动机实验平台, 如图 7 中的真实系统部分。由于实物台架中被控对象是全实物, 控制器也在真实的 ECU 控制单元中, 故测试结果对于控制器性能的评价也更具有实际意义。

除此之外, 一般的仿真测试过程还包括快速原型 (RCP, Rapid Control Prototyping)^[37-38], 也就是利用快速实时工具 (例如 dSPACE 公司的 Micro AutoBox) 将 SIL 阶段标定后的控制器与实物相连接, 如图 7 中的虚线箭头所示。通过实物测试进行控制器参数标定。这些早期的功能测试可以提前测试控制器性能并进行高效率的控制器参数标定, 此外还可以大大地减少软件故障率。

3 结论

由于汽车系统具有结构复杂且非线性、执行机构繁多且相互耦合、传感器精度有限、控制器目标多样且相互矛盾的特点, 这就使得控制算法的设计和实现需要充分考虑工程应用上的要求和限制, 即

需要从系统的角度出发进行方案的论证和性能的验证。基于模型的汽车电控系统设计不仅降低了设计周期, 还为控制算法的理论研究和工程实现搭建了一个系统设计桥梁, 使控制理论回到工程系统的层面, 并将设计集中在系统的角度。

本文以直喷汽油机燃油共轨系统轨压控制为例, 首先分析了控制需求, 并给出了控制系统的设计方案, 接着分别建立面向控制和验证的模型, 并考虑实际实现进行算法的选择, 最后从应用角度给出控制系统的验证。通过基于模型的轨压控制控制系统设计的具体过程, 说明了这种设计流程将成为多领域协作和系统集成化研究的一种有效手段。

参考文献(References)

- [1] Sangiovanni-Vincentelli A, Di Natale M. Embedded system design for automotive applications[J]. Computer, 2007, 40(10): 42-51.
- [2] Schöner H P. Automotive mechatronics[J]. Control engineering practice, 2004, 12(11): 1343-1351.
- [3] Isermann R. Mechatronic systems-innovative products with embedded control[J]. Control Engineering Practice, 2008, 16(1): 14-29.
- [4] Chen H, Gong X, Hu Y F, et al. Automotive control: the state of the art and perspective[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(4): 322-346.
- [5] Ohata A, Butts K R. Improving model-based design for automotive control systems development[C]. Proceeding of IFAC WC, Seoul, Korea, 2008:1062-1065.
- [6] Weber M, Weisbrod J. Requirements engineering in automotive development-experiences and challenges[C]. Proceedings. IEEE Joint International Conference on Requirements Engineering, Essen, Germany, 2002: 331-340.
- [7] Taylor J, Ball R, McGordon A, et al. Sizing tool for rapid optimisation of pack configuration at early-stage automotive product development[C]. Proceedings of the EVS28 International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, Goyang, Korea (south), 2015:1-8.
- [8] Bielaczyc P, Woodburn J. Trends in automotive emissions, fuels, lubricants, legislation and test methods-present and future: a brief overview from the perspective of the International Organising Committee[J]. Combustion Engines, 2014, 53(3): 93-100.
- [9] Sangiovanni Vincentelli A L, Balluchi A. Special Issue on Advanced design methodologies in automotive control[J]. International Journal of Control, 2006, 79(5): 373-374.
- [10] Guzzella L, Hrovat D, Rizzo G. Special issue on advances in automotive control[J]. Control Engineering Practice, 2006, 3(14): 195-198.
- [11] Brennan S, Buckland J, Christen U, et al. Editorial: Special Issue on Control Applications in Automotive Engineering[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 3(15): 403-405.
- [12] Gery E, Harel D, Palachi E. Rhapsody: A complete life-cycle model-based development system[C]. International Conference on Integrated Formal Methods, Springer Berlin Heidelberg, 2002: 1-10.
- [13] Schätz B, Pretschner A, Huber F, et al. Model-based development of embedded systems[M]. Advances in Object-Oriented Information Systems. Springer Berlin Heidelberg, 2002: 298-311.
- [14] Gerler J, Costin M, Fang X, et al. Model based diagnosis for automotive engines-algorithm development and testing on a production vehicle[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1995, 3(1): 61-69.

- [15] Rappl M, Braun P, Von Der Beeck M, et al. Automotive Software Development: A Model Based Approach[R]. SAE Technical Paper, No. 2002-01-0875, 2002.
- [16] Hrovat D, Di Cairano S, Tseng H E, et al. The development of model predictive control in automotive industry: A survey[C]. 2012 IEEE International Conference on Control Applications (CCA), Dubrovnik, Croatia, 2012: 295-302.
- [17] Ohata A. Importance of close linkage among modeling, control design, calibration and verification for automotive controls[C]. 2011 International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (ADCONIP), Hangzhou, P.R. China, 2011: 314-319.
- [18] Schüffele J, Zurawka T. Automotive software engineering-principles, processes, methods and tools[M]. Warrendale: SAE International; 1st Edition, 2005.
- [19] Weber J. Automotive development processes[M]. Berlin: Springer, 2014.
- [20] Del Re, Luigi. Automotive model predictive control: models, methods and applications[M]. Berlin: Springer, 2010.
- [21] Chen H, Gao B. Nonlinear Estimation and Control of Automotive Drivetrains[M]. Beijing: Springer Science & Business Media, 2013.
- [22] GUIDE S. A guide to methods and software tools for the construction of large real-time systems[M]. Manchester: National Computing Centre, 1989.
- [23] Mathur S, Malik S. Advancements in the V-model[J]. International Journal of Computer Applications, 2010, 1(12): 29-34.
- [24] D'Errico G, Onorati A. An integrated simulation model for the prediction of GDI engine cylinder emissions and exhaust after-treatment system performance[R]. SAE Technical Paper, No. 2004-01-0043, 2004.
- [25] Myung C L, Park S. Exhaust nanoparticle emissions from internal combustion engines: A review[J]. International Journal of Automotive Technology, 2012, 13(1): 9-22.
- [26] Achleitner E, Bäcker H, Funaioli A. Direct injection systems for otto engines[R]. SAE Technical Paper, No. 2007-01-1416, 2007.
- [27] 欣白宇. GDI发动机的轨压控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012. Xin B Y. Research on rail pressure control of GDI Engine[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [28] 刘奇芳. 非线性控制方法研究及其在汽车动力总成系统中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2014. Liu Q F, Research on nonlinear control and its application in vehicle powertrain systems[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [29] Gao B, Chen H, Liu Q, et al. Position control of electric clutch actuator using a triple-step nonlinear method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6995-7003.
- [30] Hu Y, Hu D, Fan Y, et al. Electronic throttle controller design using a triple-step nonlinear method[C]. 2014 11th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), Shenyang, China, 2014: 816-821.
- [31] Bringmann E, Kramer A. Model-based testing of automotive systems[C]. 2008 1st International Conference on Software Testing, Verification, and Validation, Lillehammer, Norway, 2008: 485-493.
- [32] Grimm K. Software technology in an automotive company: major challenges[C]. Proceedings of the 25th international conference on Software Engineering, Berlin, Germany, 2003: 498-503.
- [33] Fellini R, Michelena N, Papalambros P, et al. Optimal design of automotive hybrid powertrain systems[C]. Proceedings First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo, Japan, 1999: 400-405.
- [34] Suzuki K, Nemoto M, Machida K. Model-based calibration process for producing optimal spark advance in a gasoline engine equipped with a variable valve train[R]. SAE Technical Paper, No. 2006-01-3235, 2006.
- [35] Park J, Park Y, Park J H. Model based optimization of supervisory control parameters for hybrid electric vehicles[R]. SAE Technical Paper, No. 2008-01-1453, 2008.
- [36] Arsie I, Criscuolo I, Pianese C, et al. Tuning of the engine control variables of an automotive turbocharged diesel engine via model based optimization[R]. SAE Technical Paper, No. 2008-01-1453, 2011.
- [37] Hercog D, Jezernik K. Rapid control prototyping using MATLAB/Simulink and a DSP-based motor controller[J]. International Journal of Engineering Education, 2005, 21(4): 596-601.
- [38] Abel D, Bollig A. Rapid control prototyping[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2006.