浙江科技学院学报，第 34 卷第 1 期，2022 年 2 月
Journal of Zhejiang University of Science and Technology
Vol. 34 No. 1, Feb. 2022

doi：10.3969/j.issn.1671-8798.2022.01.011

电子节气门控制系统硬件在环仿真平台设计

付中元，李　强，黄夏冰，吴　坚
（浙江科技学院 机械与能源工程学院，杭州 310023）

摘　要：针对电子节气门控制系统开发过程中存在成本过高与验证过程复杂等局限性，基于华海快速控制原型开发系统设计了电子节气门控制系统硬件在环仿真平台。首先建立电子节气门数学模型，并对电子节气门进行参数辨识；其次采用遗传算法优化比例积分微分（proportional integral differential，PID）控制器的参数并设计了失效判断流程；最后建立电子节气门控制系统的硬件在环仿真平台。利用本平台进行了硬件在环仿真试验，并将实际试验结果与硬件在环仿真结果进行对比，结果表明：当输入正弦信号时，实际试验结果与仿真结果之间电子节气门的响应误差不超过 1.2%；当输入自定义信号时，二者之间的响应误差不超过 1.0%。可见，我们所设计的平台可以实现对电子节气门模型的参数辨识，以及对控制策略的快速验证。本研究结果对车载电子控制系统的开发具有一定的参考价值。

关键词：电子节气门；硬件在环；控制策略；参数辨识
中图分类号：U464.134.4　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1671-8798(2022)01-0086-08

Design of hardware-in-the-loop simulation platform for electronic throttle control system

FU Zhongyuan, LI Qiang, HUANG Xiabing, WU Jian
(School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: In response to the limitations of high cost and complex verification process in the traditional development process of electronic throttle control system, a hardware-in-the-loop simulation platform for electronic throttle control system was designed on the basis of Huahai Rapid Control Prototype Development System. Firstly, the mathematical model of electronic throttle was established, with its parameters identified. Secondly, the parameters of proportional integral differential (PID) controller were optimized by virtue of the genetic algorithm, with the failure judgment logic devised. Finally, the hardware-in-the-loop simulation platform of electronic throttle control system was established, where the hardware-in-the-loop simulation test was carried out, whose results were compared with the actual test results. The results show that when the sinusoidal signal is input, the response error of the electronic throttle between the actual test results and the simulation results does not exceed

收稿日期：2021-03-29
基金项目：浙江省自然科学基金项目(LY21E050001)
通信作者：李　强(1979—　)，男，江苏省溧阳人，教授，博士，主要从事新能源汽车机电一体化控制研究。E-mail：liqiang@zust.edu.cn。

1.2%. When the custom signal is input, the response error between the two is not more than 1.0%. It can be seen that the designed platform can realize the parameter identification of the electronic throttle model and the rapid verification of the control strategy. The research results have certain reference value for the development of vehicle electronic control system.

Keywords: electronic throttle; hardware-in-the-loop (HIL); control strategy; parameter identification

近年来，电子节气门逐渐取代了拉线式节气门，与传统的拉线式节气门相比，配备电子节气门的车辆，其加速踏板与节气门之间没有机械连接。电子节气门主要由直流电机、减速齿轮组、回位弹簧等部分组成，节气门的开度可以通过发动机电子控制单元(electronic control unit，ECU)来调节。而准确地了解电子节气门的动态特性，有利于对其进行分析及相应的控制系统设计。因此，电子节气门控制策略开发在汽车电子控制领域受到广泛的关注[1-2]。硬件在环(hardware-in-the-loop，HIL)仿真技术是一种将真实的控制器连接至虚拟的被控对象(用实时仿真硬件来模拟)的仿真测试方法，该方法能够有效缩短研发周期、降低研发成本[3-4]，并提高测试的安全性。

国内外在基于硬件在环仿真平台开发电子节气门控制系统上取得了一定的研究成果。杨君等[5]针对电子节气门开度跟踪仿真试验问题，设计了比例积分(proportional integral，PI)控制器。刘尚等[6]、任继愈等[7]设计了扩张状态观测器，解决了电子节气门挡板的角速度无法直接测量的问题，并加入了具有滑模变结构控制算法的角度传感器故障检测与故障重构功能。Bernardo 等[8]设计了具有积分作用的二次线性新型扩展最小综合控制(the linear quadratic new extended minimal control synthesis with integral action，LQ-NEMCSI)的电子节气门新型自适应控制器。多数研究者基于 dSPACE 公司的硬件在环仿真平台来验证所设计的控制器。少数研究者采用其他硬件在环仿真平台来开发，如蒋艳等[9]、葛建中等[10]、陆文昌等[11]、郭宏志等[12]分别基于 LabVIEW2010、9S12、MotoHawk、SystemVision 等搭建电子节气门控制系统的硬件在环仿真平台，并在这些平台基础上验证控制算法或比较仿真模型。在参数优化方面，毛松林等[13]提出了模型在环测试(model-in-the-loop，MIL)与硬件在环测试相结合的方式，优化了电子节气门控制器的参数。

在以上研究中，使用 dSPACE、MotoHawk 等硬件系统设计的硬件在环仿真平台，成本较高，而使用其他硬件系统与 LabVIEW 等软件组合的方式，在研究对象的数学模型参数辨识方面速度较慢，在控制方法验证过程方面也不够简便。因此，本研究构建了一种基于北京九州华海公司开发的 U2 快速控制原型开发系统套件(以下简称华海快速控制原型)，利用硬件在环仿真技术模拟电子节气门实际运行工况的硬件在环仿真平台系统，能够快速实现电子节气门参数辨识和控制方法的验证。

1　硬件在环仿真平台系统搭建

电子节气门控制系统硬件在环仿真平台系统框架如图 1 所示。硬件在环仿真平台结构如图 2 所示，主要由加速踏板总成、电子节气门、电源、上位机、电机驱动板、华海快速控制原型等组成。华海快速控制原型，成本低、操作简便，包含高度集成在 Simulink 中的工具箱、在线测量与标定工具 MeCa、自动代码生成等功能。

华海快速控制原型实时采集加速踏板位置信号与节气门位置信号，将相关的信号处理结果传输至控制算法模块当中，再输出脉冲宽度调制(pulse width modulation，PWM)信号，从而控制电子节气门门体中直流电机的运动。

在 Simulink 中建立电子节气门的控制模型。首先通过自动代码生成功能，编译控制程序代码；再利用控制器局域网络(controller area network，CAN)通信的方式将其下载到华海快速控制原型当中[14]；最后，通过开发系统套件中的 MeCa 人机交互软件对相应变量与参数进行实时测量与标定。

加速踏板总成由踏板机械结构、联轴器、2 个回位弹簧和 2 个加速踏板位置传感器等组成。为了保证位置信号输出的可靠性，采用冗余设计，在传动轴两侧同轴安装 2 个同一直流电源供电的位置传感器。2 个位置传感器的输出电压特性正好相反，输出电压呈互补方式，当其中的 1 个传感器出现故障时，传感器输出电压之和与电源电压不相等。

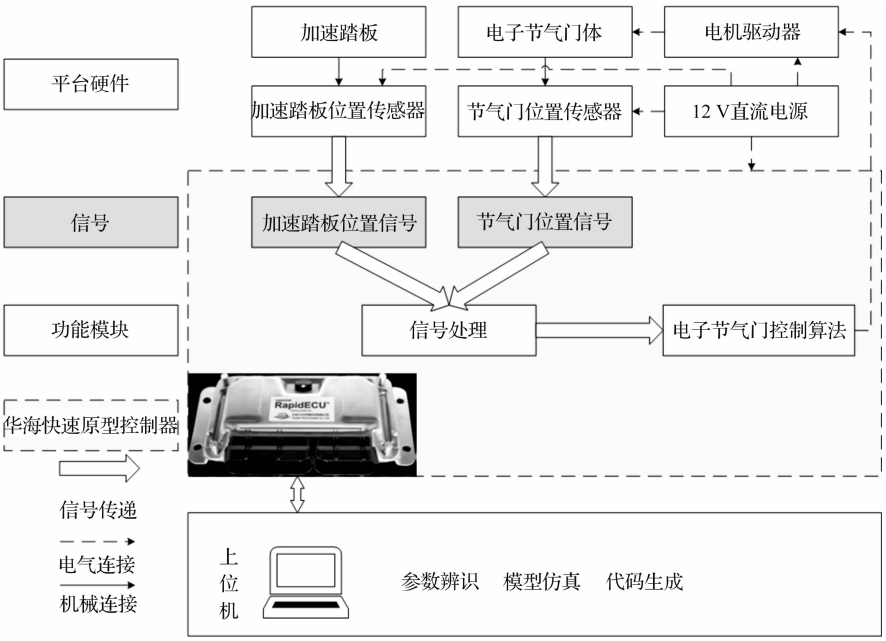


图 1 硬件在环仿真平台系统框架

Fig. 1 Block diagram of HIL simulation platform

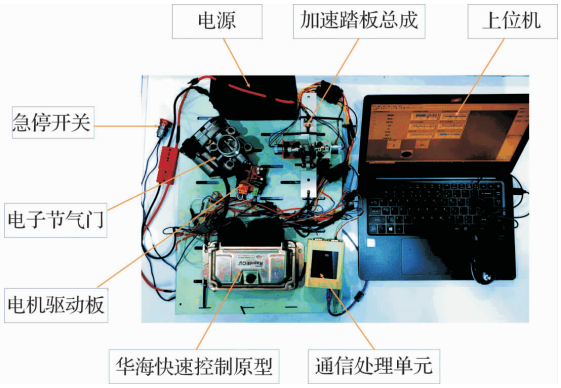


图 2 硬件在环仿真平台结构

Fig. 2 Structure of HIL simulation platform

2 电子节气门数学模型

在 Simulink 模型中，将控制算法和被控对象模型连接成 1 个闭环系统，构成一个模型在环测试结构，以便于模型的集成测试与验证算法的正确性。电子节气门本体结构如图 3 所示，具体的数学模型推导如下。

直流电机电枢回路电压平衡方程为

$$Ri + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + k_{\mathrm{b}}\dot{\theta}_{\mathrm{m}} = V_{\mathrm{bat}}D。\tag{1}$$

式(1)中：R 为转子电阻；i 为电枢电流；L 为转子电感；t 为时间；k_{b} 为电枢绕组的反电动势常数；θ_{m} 为电机电枢的转角；V_{bat} 为电源电压；D 为 PWM 信号占空比。

电枢绕组通过电流后，绕组在磁场作用下产生转动力矩，电枢的力矩平衡方程为

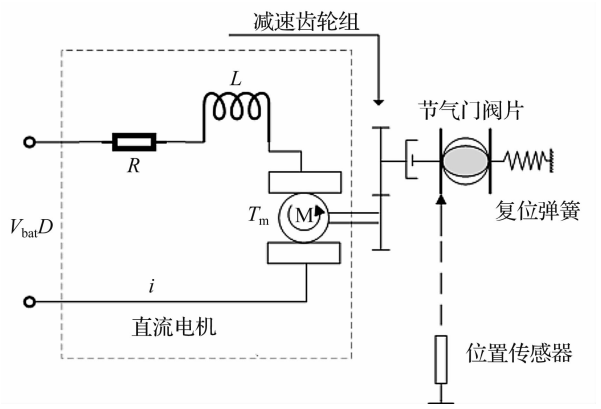


图 3 电子节气门本体结构

Fig. 3 Physical structure of electronic throttle

$$T_{\mathrm{a}} - T_{\mathrm{mf}} - T_{\mathrm{m}} = J_{\mathrm{m}}\ddot{\theta}_{\mathrm{m}}。\tag{2}$$

式(2)中：T_a 为直流电机电枢的电磁力矩；T_{mf}为直流电机电枢摩擦力矩；T_m 为直流电机输出力矩；J_m 为电枢转动惯量。

电枢的电磁力矩 T_a 与电流 I 成正比：

$$T_a = k_t I。 \tag{3}$$

式(3)中：k_t 为电机转矩系数。

节气门挡板平衡方程为

$$J_t \ddot{\theta} = T_l - T_f - T_s。 \tag{4}$$

式(4)中：J_t 为节气门挡板转动惯量；θ 为节气门挡板转角；T_f 为摩擦力矩；T_l 为减速齿轮组输出力矩；T_s 为复位弹簧力矩。

复位弹簧力矩 T_s 的方程为

$$T_s = k_{sp}\mathrm{sign}(\theta - \theta_0)。 \tag{5}$$

式(5)中：k_{sp}为弹簧的弹性系数；θ_0 为节气门挡板的初始转角；k_{pre}为弹簧的预紧力矩系数。

本研究只考虑节气门的静摩擦及滑动摩擦，故电子节气门内部的摩擦力矩的数学方程为

$$T_f = k_{tf}\mathrm{sign}(\dot{\theta}) + k_f \dot{\theta}。 \tag{6}$$

式(6)中：k_{tf}为静摩擦系数；k_f 为滑动摩擦系数。

电子节气门的减速齿轮组输出力矩方程为

$$T_l = nT_m。 \tag{7}$$

式(7)中：n 为减速齿轮组减速比，$n=\theta_m/\theta$，忽略齿轮间隙对减速比的影响。

结合式(1)～(7)可推导出如下方程：

$$(J_t + J_m)n^2 \ddot{\theta} = \frac{nV_{bat}k_t}{R}u - k_{tf}\mathrm{sign}(\dot{\theta}) - \left(\frac{k_b k_t n^2}{R} + k_t\right)\dot{\theta} - k_{sp}(\theta - \theta_0) - k_{pre}\mathrm{sign}(\theta - \theta_0)。 \tag{8}$$

令 $J=(J_t+n^2 J_m)$，将其代入式(8)中，进一步整理得：

$$\ddot{\theta} = \frac{k_{tf}}{J}\mathrm{sign}(\dot{\theta}) - \left(\frac{k_b k_t n^2}{RJ} + \frac{k_f}{J}\right)\dot{\theta} - \frac{k_{sp}}{J}(\theta - \theta_0) - \frac{k_{pre}}{J}\mathrm{sign}(\theta - \theta_0) + \frac{nV_{bat}k_t}{RJ}D。 \tag{9}$$

令 $a_1=\frac{k_{sp}}{J}$，$a_2=\left(\frac{k_b k_t n^2}{RJ}+\frac{k_f}{J}\right)$，$a_3=\frac{k_{pre}+k_{tf}}{J}$，$a_4=\frac{nV_{bat}k_t}{RJ}$，式(9)可整理出如下系统状态方程：

$$\begin{pmatrix}\dot{\theta}(t)\\ \ddot{\theta}(t)\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}0 & 1\\ a_1 & a_2\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\theta(t)\\ \dot{\theta}(t)\end{pmatrix} + (0 \quad a_3)\begin{pmatrix}0\\ T(t)\end{pmatrix} + a_4 D。 \tag{10}$$

3　电子节气门参数辨识与控制策略

3.1　参数辨识

3.1.1　参数辨识过程

由式(10)可知，系统状态方程中存在未知参数 a_1、a_2、a_3、a_4，故使用 MATLAB 系统辨识工具箱对其进行参数辨识[15-16]。通过设置合理的测试输入信号及激励幅值，可以大幅降低低速非线性摩擦对辨识结果的影响，从而提高辨识模型与实际系统的拟合度。首先，通过采用硬件在环平台，将设置为正弦信号、周期为 10 s、占空比在 0 至 100％之间变化的系统测试信号输入 PWM 控制的电机驱动器中，驱动直流电机运行；然后，将采集到的位置数据与电机两端电压输入系统辨识工具箱。依据式(10)，在工具箱中设置系统阶数后，利用该工具箱辨识电子节气门系统状态方程的相应参数 a_1、a_2、a_3、a_4。

3.1.2　参数辨识结果

4 个参数的辨识结果见表 1，代入式(10)后得到辨识后的电子节气门系统状态方程。将模型的输入信号设为 PWM 信号占空比，模型的输出信号设为节气门开度，建立如图 4 所示的参数辨识后的电子节气门数学模型。

表 1 参数辨识结果

Table 1 Parameter identification results

参数	辨识结果
a_1	9.171×10^{-4}
a_2	2.873×10^{-4}
a_3	5.040×10^{-4}
a_4	-5.454×10^{-4}

将系统测试信号输入参数辨识工具箱后的电子节气门数学模型中，并将参数辨识后电子节气门数学模型输出与位置传感器输出做对比(图 5)。经过工具箱辨识后，二者拟合度达 93.29%，可见本模型可以较好地描述真实电子节气门系统。

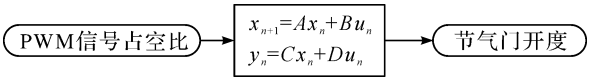


图 4 参数辨识后的电子节气门数学模型

Fig. 4 Mathematical model of electronic throttle after parameter identification

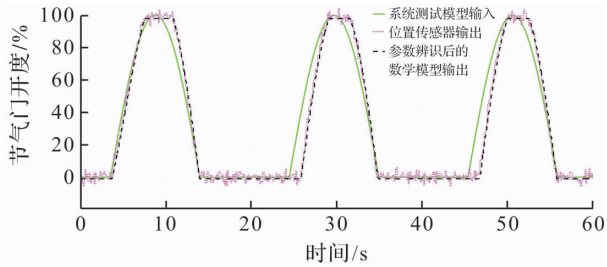


图 5 参数辨识后电子节气门数学模型输出与位置传感器输出对比

Fig. 5 Output comparison between electronic throttle mathematical model and position sensor output after parameter identification

3.2 控制策略

3.2.1 控制器优化

电子节气门的控制策略，应当保证控制器具有较高的稳定性与精度，处理输入的加速踏板信号时，响应过程快，与开环控制相比较，具有较短的稳定时间与较小的超调值。

对闭环阶跃信号输入下的比例积分微分(proportional integral differential，PID)控制器进行设计优化。PID 控制器参数的整定方法主要有经验数据法、临界比例法、粒子群法、遗传算法、退火算法等优化算法。本研究选择 MATLAB 及遗传算法直接搜索工具箱[17]进行 PID 参数的整定，以稳定时间短、超调值小、低稳态误差为主要目标。

在 PID 控制器中，将比例系数 K_p、积分系数 K_i、微分系数 K_d 设为自变量，3 者的优化区间都设为 0～100，遗传代数设为 100。性能评价标准方面选用时间乘绝对误差积分(integrated time absolute error，ITAE)准则，ITAE 准则能够较好地调节系统的响应时间，按此准则设计的控制系统瞬态响应的振荡性小。ITAE 准则如式(11)所示。

$$Q=\int_0^{+\infty} t\mid e(t)\mid \mathrm{d}t。\tag{11}$$

式(11)中：Q 为 ITAE 值；$e(t)$为位置误差。

适应度和控制器参数计算结果如图 6 所示。经过遗传算法优化后，得到 ITAE 极小值为 9.255 99，此时最佳个体的 3 个系数 K_p、K_i、K_d 分别为 4.506 15、0.817 125、0.190 316。

PID 控制器优化后阶跃曲线响应对比如图 7 所示，控制器在优化前，稳态值为 86.71%，稳态误差大于 10%，稳定时间约为 0.5 s；控制器在优化后，反应时间为 0.01 s，稳态值为 99.56%，稳定时间为 0.22 s，超调量为 0.2%。仿真结果证明进行遗传算法优化后的 PID 控制器的控制效果优良。

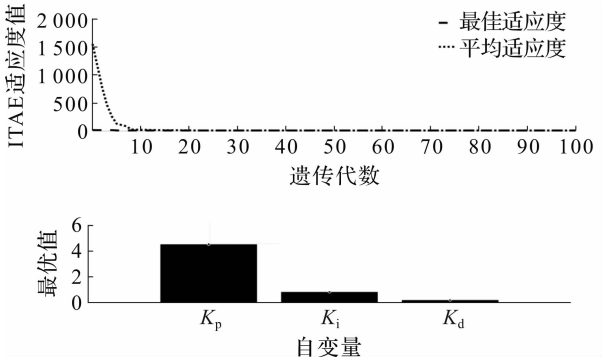


图 6 适应度和控制器参数计算结果

Fig. 6 Parameter calculation results of fitness and controller

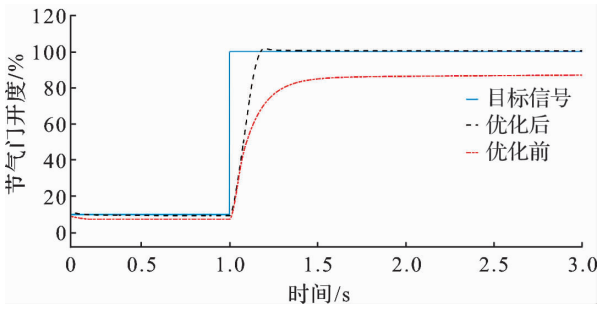


图 7 PID 控制器优化后阶跃曲线响应对比

Fig. 7 Comparison of step curve response after optimizing PID controller

3.2.2　硬件在环仿真平台控制策略设计与失效判断逻辑

由于控制系统采样方式是离散的，控制量根据当前时间与过去时间的偏差来计算，以致处理数据不连续，因此需要对 PID 控制策略离散化。离散化后，硬件在环控制模型主体结构以控制器为中心，实时地计算电子节气门期望开度 $\theta_r(t)$ 与节气门的实际开度 $\theta(t)$，通过比较器计算得出位置误差 $\varepsilon(t)$ 后再经过 PID 控制器计算，确定 PWM 信号的占空比 $D=U_{(t)}/V_{\text{bat}}$。

为避免出现反转或超过正向限位，分别与系统的最小电压 $U_{\min}$、最大电压 $U_{\max}$ 做比较，最后输出 PWM 信号的占空比并发送给输出模块。为了防止任意节气门位置传感器出现故障或供电电压低于额定电压而导致传感器采集模块出错，仿真平台中加入了位置传感器失效报警检测模块，如果检测到位置传感器异常，该模块会输出报警信号，失效判断的数学表达式如式(12)所示。控制策略流程图如图 8 所示。

$$U_{\text{A}}+U_{\text{B}}\leqslant U,U_{\text{A}}\neq 0,U_{\text{B}}\neq 0。\tag{12}$$

式(12)中：U_{A} 为传感器 A 输出电压；U_{B} 为传感器 B 输出电压；U 为电源电压。

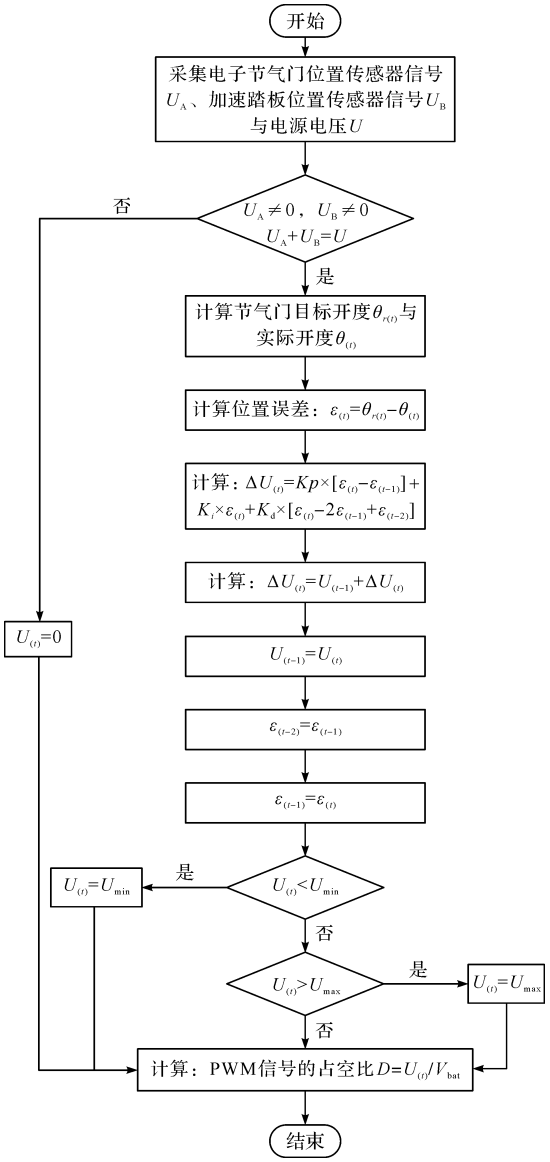


图 8　控制策略流程图

Fig. 8　Flow chart of control strategy

4　仿真试验分析与试验验证

4.1　模型在环仿真试验

为了验证经过遗传算法优化后的电子节气门控制模型的合理性，先进行了模型在环仿真验证。考虑到实际使用工况中电子节气门工况存在大开度变化、小开度变化、瞬间变化、平缓变化等[16]，本研究采用正弦信号和自定义输入信号等作为输入信号来考察系统的响应输出。

4.1.1　正弦信号响应

为了考察电子节气门控制模型的动态跟踪指标，同时保证目标信号的节气门开度都位于零位以上，设计了输入位置跟踪目标 $y=30\sin(4x+10)=40$ 的正弦信号。

PID 控制器优化前后的正弦信号响应如图 9 所示，输入正弦信号后，优化前电子节气门控制模型响应滞后时间约为 0.07 s，极大值误差达到 8.6%，与目标信号拟合度不高；经过遗传算法优化后的电子节气门控制模型响应滞后时间小于 0.01 s，误差小于 2.5%，动态跟随特性较好，基本上满足控制要求。

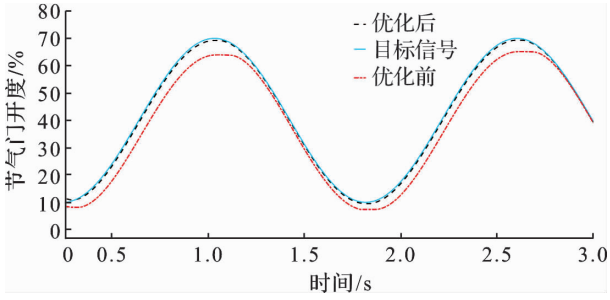


图 9　PID 控制器优化前后的正弦信号响应

Fig. 9　Response of PID controller before and after optimization under sinusoidal signal

4.1.2 自定义输入信号响应

本研究采集了 ATTACKER-2020 方程式赛车直线加速工况下的实际加速踏板位置数据，以进一步检验控制策略的性能。

PID 控制器优化前后的自定义输入信号响应如图 10 所示，输入自定义输入信号后，优化前电子节气门控制模型响应滞后时间超过 0.4 s，误差大于 13%，动态跟随性能差；经过遗传算法优化后的电子节气门控制模型响应在前期存在约 0.05 s 的滞后时间，模型响应较快，误差小于 1%，且节气门有一定的初始开度，可以保证在节气门最小开度下发动机能够怠速运行。

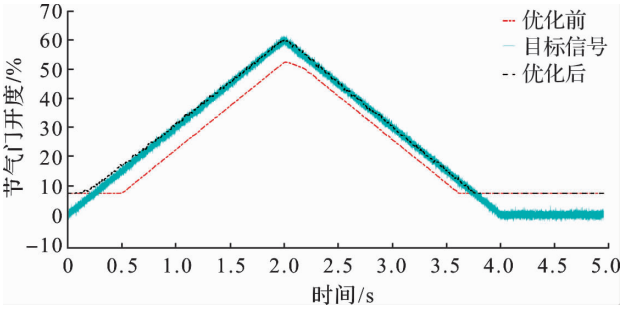


图 10 PID 控制器优化前后的自定义输入信号响应

Fig. 10 Response of PID controller before and after optimization under custom input signal

对上述 2 种不同输入信号的模型在环仿真试验表明，优化后的控制模型动态跟随性能较好，可以满足实际需要。

4.2 硬件在环仿真试验

4.2.1 人机交互界面

硬件在环仿真平台中上位机的人机交互界面可以实时检测控制模型的输出数据与标定程序参数。MeCa 是一种通用的 ECU 测量和校准工具，具有实时采集与显示数据、数据测量与校准、刷写 ECU 程序等功能。在导入 MATLAB 自动代码生成的 *.a2l 格式文件后，可以导入模型数据库。MeCa 人机交互界面如图 11 所示，本研究对相关需要标定的参数与需要测量的数据在 MeCa 中建立了对应的可视化界面与标定选项，试验时，可以考察各传感器和执行器的性能，同时采集测试数据，然后对各传感器进行标定，对电子节气门的控制策略进行实时验证，并对控制器的相关参数进行修改。



图 11 MeCa 人机交互界面

Fig. 11 MeCa human-computer interface

4.2.2 硬件在环仿真试验结果与分析

为了验证电子节气门硬件在环仿真平台的可行性，依次输入阶跃信号、正弦信号和自定义输入信号，通过 MeCa 采集得到电子节气门的开度响应。

阶跃信号下电子节气门与仿真模型响应输出对比如图 12 所示，输入 10%～100%阶跃信号后，电子节气门实际响应稳定时间为 0.27 s 左右，比模型在环仿真响应有一定的延后，超调值约为 0.2%，稳态误差在 0.1%以内，稳定性较好，与模型在环仿真数据基本上一致。

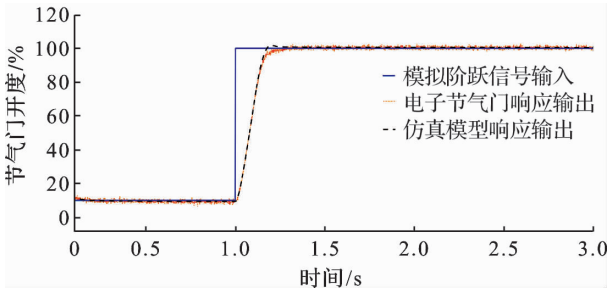


图 12 阶跃信号下电子节气门与仿真模型响应输出对比

Fig. 12 Comparison of response output between electronic throttle and simulation model under step signal

正弦信号下电子节气门与仿真模型响应输出对比如图 13 所示，输入正弦信号 $y=30\sin(4x+10)+40$ 后，电子节气门实际输出结果与模型在环仿真的输出结果基本上一致，二者误差不超过 1.2%，响应滞后均不明显且误差小，动态跟随性能较好。

自定义输入信号下电子节气门与仿真模型响应输出对比如图 14 所示，输入自定义输入信号后，电子

节气门响应在前期有微小的滞后性，响应较快，无超调值，电子节气门实际输出结果与模型在环仿真的输出基本一致，二者误差不超过 1.0%。

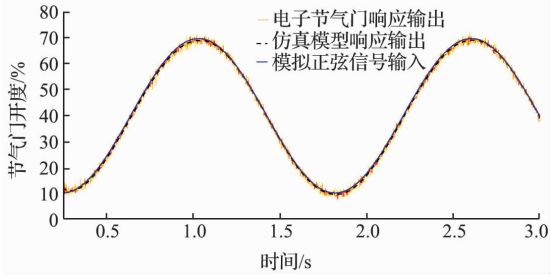


图 13　正弦信号下电子节气门与仿真模型响应输出对比

Fig. 13　Comparison of response output between electronic throttle and simulation model under sinusoidal signal

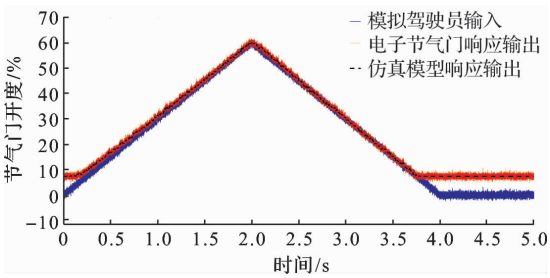


图 14　自定义输入信号下电子节气门与仿真模型响应输出对比

Fig. 14　Comparison of response output between electronic throttle and simulation model under customized input signal

通过对多种工况的仿真分析与对比发现，我们所设计的硬件在环平台试验结果与模型在环的仿真试验结果基本上一致，可见本硬件在环仿真平台能较准确地反映电子节气门的真实动态特性。

5　结　语

本研究建立了电子节气门的数学模型及系统状态方程，通过参数辨识简化了模型；基于华海快速控制原型设计了电子节气门控制系统硬件在环仿真平台，集成遗传优化算法，经过优化后所得的 PID 控制器，能够精确与快速地实现节气门控制。本平台能够对电子节气门控制策略进行快速验证，还可以较好地模拟各种工况下的动态响应，对电子节气门运行状态进行实时检测与反馈。因此，本硬件在环仿真平台也可以推广到一些相似的闭环控制系统中，具有一定的工程应用价值。

参考文献：

[1]　陈敏，郑建波，张凡武，等. 电子节气门控制策略的实现与标定匹配[C]//2014 中国汽车工程学会年会论文集精选. 柏林：斯普林格出版社，2014：600.

[2]　肖寿高. 电子节气门控制系统的研究与仿真[D]. 西安：长安大学，2011.

[3]　曹森龙，李强，杨礼康. 基于 dSPACE 的 AMT 电控操纵系统试验台设计[J]. 汽车技术，2015，475(4)：41.

[4]　王喜莲，赵鹏宇，王华巍，等. 永磁同步电机模拟系统硬件在环仿真平台研究[J]. 北京交通大学学报，2021，45(1)：119.

[5]　杨君，任慧超，郭峻宇. 电子节气门开度跟踪仿真试验研究[J]. 现代制造技术与装备，2020，56(9)：17.

[6]　刘尚，童亮，路艳群，等. 汽车电子节气门角度传感器的故障检测与重构[J]. 仪表技术与传感器，2017，418(11)：97.

[7]　任继愈，童亮，党瑾希，等. 汽车电子节气门自适应模糊滑模控制器[J]. 实验技术与管理，2020，37(5)：104.

[8]　DI-BERNARDO M，DI-GAETA A，MONTANARO U，et al. Synthesis and experimental validation of the novel lqnemcsi adaptive strategy on an electronic throttle valve[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology，2010，18(6)：1325.

[9]　陆文昌，高海宇，孟鑫，等. 基于 MotoTron 平台的 ETC 控制系统设计与试验研究[J]. 内燃机工程，2010，31(6)：59.

[10]　郭宏志，陈虹，宋同好，等. 基于 SystemVision 的汽车电子节气门联合仿真系统[J]. 系统仿真学报，2011，23(2)：280.

[11]　蒋艳，钱伟康，倪元鸿. 基于 LabVIEW 的电子节气门开度闭环控制系统设计[J]. 计算机系统应用，2012，21(2)：47.

[12]　葛建中. 汽车电子节气门半实物仿真装置的开发[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版)，2011(6)：28.

[13]　毛松林，刘青林，何博. 电子节气门控制系统开发[J]. 内燃机与配件，2017，241(13)：11.

[14]　陈力，王海江，吴凯. 基于卷积神经网络的车载网络入侵检测方法[J]. 浙江科技学院学报，2021，33(1)：59.

[15]　赵靖华，张博文，王建森. 基于多元回归混合优化算法参数辨识的电子节气门开度跟踪控制研究[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版)，2020，41(4)：98.

[16]　冯凯. 电子节气门参数辨识及非线性补偿控制器设计[D]. 长春：吉林大学，2020.

[17]　刘林峰. 电子节气门控制方法研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2018.