

基于动态模拟技术的混合动力车辆发动机 电控单元检测系统设计

韩锐

(广西现代职业技术学院 信息工程学院, 广西 河池 547017)

摘要: 电控单元是混合动力车辆发动机中的重要组成部分, 对于发动机以及混合动力车辆的行驶性能产生直接影响, 为保证电控单元的运行正常, 利用动态模拟技术, 优化设计了混合动力车辆发动机电控单元检测系统; 改装温度、转速等传感器设备以及信号处理设备, 调整系统电路的连接方式, 实现硬件系统的优化; 利用动态模拟技术模拟混合动力车辆发动机电控过程, 结合不同故障类型下电控单元的运行特征, 设置系统的检测标准; 采集电控单元输出信号, 从时域和频域两个方面提取信号特征, 最终通过特征匹配确定电控单元状态、故障类型以及故障位置, 实现系统的电控单元检测功能; 综合混合动力车辆的3种运行场景, 通过系统测试实验得出结论: 与传统检测系统相比, 优化设计系统的漏检率和误检率分别降低了2.59%和2.05%, 由此证明优化设计系统具有良好的检测功能。

关键词: 动态模拟技术; 混合动力车辆; 发动机电控单元; 检测系统

Hybrid Vehicle Engine Electronic Control Unit Detection System Based on Dynamic Simulation Technology

HAN Rui

(College of Information Engineering, Guangxi Modern Vocational and Technical College, Hechi 547017, China)

Abstract: The electronic control unit (ECU) is an important part of the hybrid vehicle engine, which has a direct impact on the driving performance of the engine and hybrid vehicle. In order to ensure the normal operation of the ECU, the dynamic simulation technology is used to optimize the design of the ECU detection system of the hybrid vehicle engine. Modify the temperature, speed and other sensor equipment and signal processor equipment, adjust the connection mode of the system circuit, and achieve the optimization of the hardware system. The dynamic simulation technology is used to simulate the electric control process of the hybrid vehicle engine, and the test standard of the system is set according to the operation characteristics of the electronic control unit under different fault types. The output signal of the ECU is collected, the signal features are extracted from the time domain and frequency domain, and the status, fault type and fault location of the ECU are determined by the feature matching to realize the ECU detection function of the system. Based on three operating scenarios of the hybrid vehicle engine, the system test results show that compared with the traditional detection system, the missed and false detection rates of the optimized design system are reduced by 2.59% and 2.05% respectively, which proves that the optimized design system has good detection function.

Keywords: dynamic simulation technology; hybrid vehicles; engine electronic control unit; detection system

0 引言

混合动力是指同时装备热动力源和电动力源的汽车, 将电机应用于混合动力汽车, 可使动力系统根据车辆的实际工作条件进行灵活调节, 同时使发动机工作在最优的状态下, 达到降低燃油消耗和排放的目的。与传统车辆相比, 混合动力对燃油的消耗量更少, 同时工作程序更复杂, 发生故障的概率更大。混合动力车辆的动力系统中发动机及电控单元是决定混合动力车辆正常行驶性能的直接因素^[1]。发动机

是为混合动力车辆提供动力的装置, 而电控单元则是电气控制单元, 具体来说, 就是将各种电气部件结合在一起, 以达到对一个或一些对象进行控制, 以确保被控设备的安全可靠运行。

混合动力车辆发动机电控单元常见的故障包括了以下方面: 怠速不稳、加速不良、起步过渡不平稳等。由于混合动力汽车发动机电控单元组成元素较多, 其故障诊断与检测牵扯内容较多, 给混合动力车辆发动机电控单元检测工作带来较大难度。为实现对混合动力车辆发动机电控单元的精准检测, 设计

收稿日期: 2023-07-20; 修回日期: 2023-08-14。

基金项目: 2023年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2023KY1470)。

作者简介: 韩锐(1974-), 男, 研究生, 讲师。

引用格式: 韩锐. 基于动态模拟技术的混合动力车辆发动机电控单元检测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(2): 93-98, 104.

并开发了混动车辆发动机电控单元检测系统。从目前电控单元检测系统发展较为成熟的研究成果包括：文献 [1] 提出的基于机器视觉的发动机检测系统、文献 [2] 提出的基于大数据的发动机检测系统以及文献 [3] 提出的基于改进 YOLOv4 的发动机检测系统，其中文献 [1] 提出系统根据轮廓点的距离—位置、坡度—位置等顺序曲线，对轮廓点进行选择和剔除，基于最小二乘法，对选取的轮廓点进行圆弧拟合，实现对轮廓点的外径测量，针对 VVT 发动机端面存在的刮擦等缺陷，利用连通性分析，确定被检测区域，利用支持向量机对其进行分类，完成发电机缺陷的检测。文献 [2] 提出系统由数据采集模块、数据库、智能分析模块、检测模块、信息查询和维修模块以及检修模块等部分组成。为了防止人为操作对故障检测造成的影响，使用卷积神经网络的故障检测模式，对发动机进行故障类型的识别，并对卷积神经网络结构进行设计，从而提高故障检测的智能化程度。而文献 [3] 提出系统在路径聚集网络中，建立一个底层的特征融合层，将更多的浅层特征和更深层的特征进行融合，从而提升该网络对小目标损坏的检测能力。为了降低网络中的冗余参数，将一个深度可分卷积引入到一个颈部结构中，并将标准卷积重新构造成一个深度可分卷积的形式，通过特征提取与匹配，输出发动机的检测结果。然而上述传统检测系统存在明显的检测功能与运行性能问题，主要体现在检测误差大、检测响应速度慢等方面，为此引入动态模拟技术。

动态模拟技术就是对真实事物或过程进行模拟的技术，将其应用到混动车辆发动机电控单元检测系统的优化设计工作中，通过对发动机电控单元运行状态的模拟判断当前电控单元是否存在运行故障，通过系统优化以期能够在加快检测速度的同时，提高系统的检测精度。

1 混动车辆发动机电控单元检测硬件系统设计

优化设计的混动车辆发动机电控单元检测的基本原理是确定电控单元在正常状态下的运行特征，在此基础上收集当前电控单元的运行数据，并与正常运行特征进行匹配，若当前运行特征与正常状态下的运行特征差距较大，则认为当前电控单元存在运行故障，进而得出故障类型、故障位置等信息的检测结果^[2]。为了方便车辆发动机电控单元信息的采集、分析与处理，需要在待检测的电控单元中安装传感器、处理器等设备。结合优化设计系统软件功能的运行需要，对硬件设备以及连接电路进行改装与调整，保证系统硬件与软件部分的适配度。

1.1 车辆发动机电控单元传感器

优化设计的混动车辆发动机电控单元检测系统中使用的传感器包括温度传感器、发动机转速传感器、霍尔传感器等。

温度传感器在结构设计上包括前端感应电路、带隙参考电路、运放和模数转换器等部分。其中，前端传感电路采用三极管基极—发射极上电压的差值来实现负值的输出，

双路电压差值来实现正值的输出。由于电压差的输出值很小，所以在设计电路的时候，通常会使用全差分运算放大器来对信号进行放大，放大后的差分信号再经过 ADC 来对感温电路输出的电压进行采样和量化，并输出数字码^[3]。发动机转速传感器和霍尔传感器主要用来获取发动机转速和曲轴的精准位置，发动机转速传感器是一种电磁感应式传感器，安装在发动机缸体的左侧，传感器中有电磁感应线圈，并与曲轴上齿圈的轮齿相对应。齿圈的轮齿有两个缺齿，可用于识别曲轴的位置。在发动机转动的同时，曲轴内的环形齿轮也随之转动，感应器内的电磁场也随之改变，从而产生一种感应电压，并把信号传输给上位机^[4]。该电压脉冲的频率与发动机的速度成比例，由计算机对其频率信号进行分析，得到发动机的速度。另外霍尔传感器的基本原理为：当电流以与磁场相垂直的方向流过被置于磁场中的半导体衬底时，在与电流与磁场相垂直的半导体衬底的横表面上会出现霍尔电压，该电压与电流与磁场的强度成比例。在叶轮的凹槽面对空气间隙时，磁体产生的磁力通过导板、空气间隙和半导体衬底形成一个回路，在这个回路中，传感器会输出一个霍尔电压，而在叶轮的刀片进入空气间隙后，刀片会绕过原磁路，此时传感器不会输出一个霍尔电压。在传感器安装过程中，需保证传感器之间型号的适配度，保证不同类型的传感器数据能够统一处理，且传感器之间的运行不会产生互斥现象^[5]。

1.2 车辆发动机电控信号处理器

车辆发动机电控信号处理器主要用来完成对车辆发动机电控单元传感信号的处理，使输出的传感信号满足系统的输入要求。

电控信号处理器内置传感器接口和通信接口，输入的传感器输出信号通过运放电路对其阻抗进行匹配、放大，将其调制成为可供数据检测装置接收的模拟信号；在对继电器状态进行测量的基础上，对继电器状态进行测量，并对其测量^[6]。在信号调制电路中，由于输入信号的特性和幅值存在差异，在调制电路中，必须对信号的特性进行变换，并采用多通道开关来实现门控，从而节省 A/D 的资源。在车辆发动机电控信号处理器中添加一个低通滤波器元件，为提高初始电控检测信号的采集质量提供执行装置。

1.3 系统电路设计

考虑混动车辆发动机电控单元检测系统中硬件装置的改装结果，对系统中部分电路的连接方式进行调整^[7]。分压隔离电路的调整结果如图 1 所示。

模拟信号经衰减电路进行衰减，再由比例放大电路处理后，转为 $\pm 10\text{ V}$ 范围内的标准信号，由模拟板卡读取数值，完成模拟量的读取。实现大电压衰减和电压跟随采集的功能^[8]。另外，可靠稳定的电源电路是硬件系统各部件功能正常的基本保证，采用转向电源芯片取代常规系统中的电源芯片，使其工作温度范围更宽，既能满足系统需求，又能将浪涌电压对系统电源的影响降到最低，同时有效提升

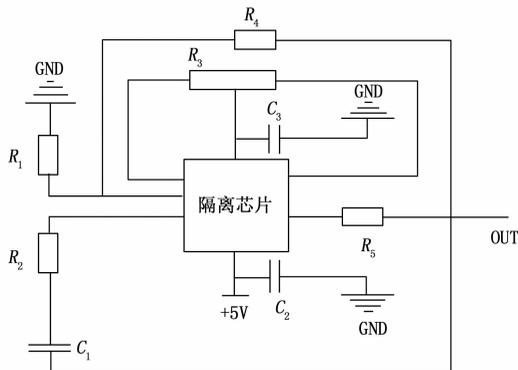


图 1 分压隔离电路图

系统硬件的抗干扰能力。

2 混动车辆发动机电控单元检测系统软件功能设计

在硬件系统的支持下，对混动车辆发动机电控单元检测系统的软件部分进行优化设计，系统软件功能的设计与执行原理为：利用动态模拟技术模拟正常状态下混动车辆发动机电控单元中各个元件的执行过程，并得出正常状态下电控单元的标准运行特征。针对不同的电控单元故障类型，设置电控单元的检测标准，利用传感器装置采集发动机电控单元的实时运行信号，通过对信号特征的提取与分析，判断当前混动车辆发动机电控单元是否存在故障，并确定故障类型以及故障位置，完成系统的检测功能。

2.1 动态模拟技术

混动车辆发动机电控过程模拟的目的是确定发动机电控单元在不同状态下的运行特征，为电控单元检测标准的制定提供参考，并将发动机电控单元运行过程中容易出现故障的节点位置作为电控运行信号采集的测点位置^[9]。为保证混动车辆发动机电控单元工作过程的模拟结果与电控单元的实际运行过程相符，利用动态模拟技术进行电控过程模拟。动态模拟技术的基本运行流程如图 2 所示。

从图 2 中可以看出，动态模拟技术的运行大体可以分为两个步骤，首先建立模拟对象的等效模型，根据电控单元中各个元件的工作原理，实时获取电控单元的动态运行数据；然后将其添加到构建的等效模型中，实现模型状态的调整，通过电控单元实际运行状态与同步动态调整，得出最终的模拟结果^[10]。混动车辆发动机电控单元的主要功能包括控制发动机启动、怠速、空燃比、极限转速、减速断油、燃油蒸气回收、爆震、电动燃油泵自诊断等，从组成结构上来看，电控单元由发动机控制器、点火线圈和火花塞、喷油器等部分组成，具体的组成结构如图 3 所示。

电控单元通过引擎控制模块设定工作方式，通过油门的位置和位移速率来分析驾驶员的意图，获得油门传递的基本期望值^[11]。在运行过程中，将混动车辆发动机的实时运行数据表示为：

$$x_{\text{engine}} = \kappa_{\text{gather}} \cdot \kappa_{\text{transmission}} \cdot x \quad (1)$$

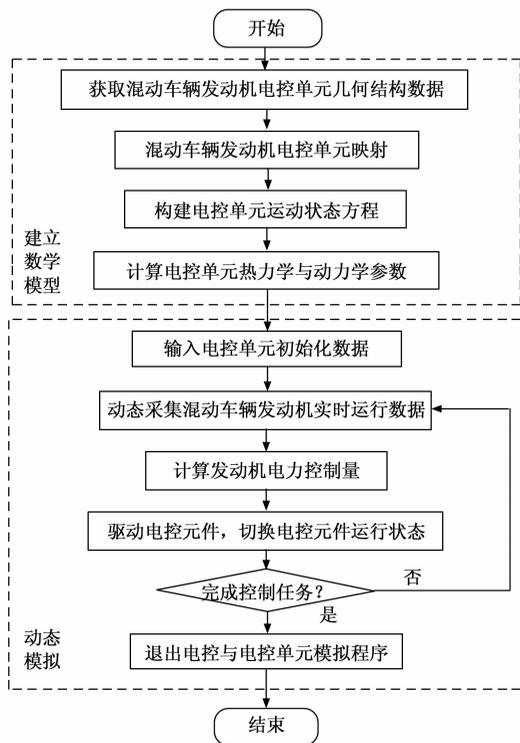


图 2 发动机电控单元的动态模拟流程图

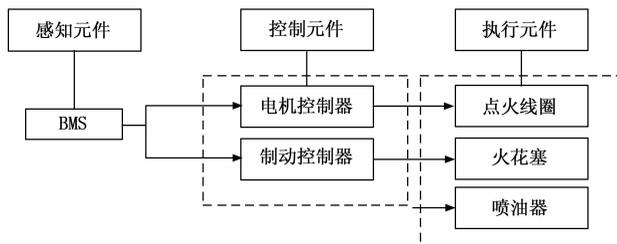


图 3 混动车辆发动机电控单元组成结构图

其中： κ_{gather} 和 $\kappa_{\text{transmission}}$ 分别为发动机的采集系数和传输系数， x 为发动机的实际运行数据，初始采集的发动机数据包括发动机转速、节气门角度等，根据发动机的控制目标计算电控单元的执行控制量，计算公式如下：

$$C_x = x_{\text{engine}} - x_{\text{target}} \quad (2)$$

式中， x_{target} 表示混动车辆的发动机控制目标，若计算得出控制量取值为 0，证明当前混动车辆发动机的运行状态与控制目标一致，无需启动电控单元程序，若计算得出 C_x 的值为正数，则向当前发动机运行的反方向执行电控任务，否则向当前发动机运行方向执行电控任务，由此可以根据公式(2)的计算结果判断是否启动电控单元，并以控制量计算结果为内容生成控制指令^[12]。在混动车辆发动机电控过程动态模拟过程中，重复上述过程，根据实时数据的采集结果，切换电控单元的运行状态，直至当混动车辆发动机停止运行。

2.2 设置混动车辆发动机电控单元检测标准

混动车辆发动机电控单元的故障类型包括：电控元件

启动困难、电控元件怠速不稳、电控单元运行偏差、电控单元爆震等,以电控元件启动困难为例,在该故障下电控单元的运行特征可以表示为:

$$\tau_{\text{Difficulty in starting}} = t_{\text{firing}} - t_0 \neq 0 \quad (3)$$

其中: t_{firing} 和 t_0 分别为发动机电控单元的实际启动时间和理论启动时间^[13]。同理可以得出电控元件怠速不稳、电控单元运行偏差和电控单元爆震故障下电控单元的标准运行特征为:

$$\begin{cases} \tau_{\text{unstable idle speed}} = \frac{v_{t+1} - v_t}{\bar{v}} - \frac{v_t - v_{t-1}}{\bar{v}} \neq \alpha \\ \tau_{\text{deviation}} = C_x - C' \neq 0 \\ \tau_{\text{knockings}} = A_{\text{vibrate}} > A_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, v_{t+1} 、 v_t 和 v_{t-1} 分别对应的是连续 3 个时刻的电控元件执行速度, α 为常数系数, C_x 和 C' 对应的是电控元件的理论控制量和实际输出控制量, A_{vibrate} 和 A_0 分别为电控元件输出信号的振动信号幅值与幅值阈值^[14]。按照上述方式可以得出混合动力发动机电控单元其他故障下的标准运行特征,并以此作为混合动力发动机电控单元的检测标准。

2.3 采集混合动力发动机电控单元输出信号

利用安装在混合动力发动机电控单元上的传感器设备,获取电控单元的实时运行与输出信号^[15]。需要采集的混合动力发动机电控单元运行信号包括转速、温度、压力以及运行状态等,电控单元实时转速信号的采集过程可以量化表示为:

$$v(t) = \frac{60f}{\delta} \quad (5)$$

式中,变量 f 和 δ 分别表示发动机电控单元的工作频率及其内部电机的极对数^[16]。电控单元工作温度数据的采集结果为:

$$T(t) = \frac{\lg(R_t)}{B} \quad (6)$$

式中, R_t 表示 t 时刻温度传感器中的热敏电阻值, B 表示电控单元的材质系数。同理可以得出混合动力发动机电控单元压力以及元件工作状态数据的采集结果。在对混合动力发动机电控单元的输出信号进行采集之前,需要将其转换成数字信号,然后用计算机对其进行处理和分析,并从中提取相关的参数和信息。由于计算机仅能对有限长度的离散时序进行处理,因此需要对连续的模拟信号进行取样并对其进行截断^[17]。在采样过程中,将一串相等间隔的周期脉冲与模拟信号作点积,而截断则是对信号进行加窗处理。设置混合动力发动机电控单元输出信号的采集频率为:

$$\omega_{\text{sampling}} = \frac{1}{\Delta t_{\text{sampling}}} \quad (7)$$

其中: $\Delta t_{\text{sampling}}$ 为采样间隔。在式 (7) 表示采集频率的驱动下,按照上述方式获取发动机电控单元的实时输出信号,并对不同传感器输出的信号采集结果进行融合处理,融合处理过程如下:

$$\begin{cases} x_g = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, x \in v(t) \cup T(t) \\ X = \sum x_g \cdot \bar{\omega} \end{cases} \quad (8)$$

从式 (8) 中可以看出,在初始信号融合之前首先需要对信号进行归一化处理,保证异构信号之间的可融合性,变量 x_{\min} 和 x_{\max} 分别表示初始采集信号的最小值和最大值, x_g 为信号的归一化处理结果, $\bar{\omega}$ 为数据融合权重值^[18]。重复上述操作,实现在混合动力发动机运行状态下电控单元输出信号的实时采集。

2.4 提取混合动力发动机电控信号特征

以获取的混合动力发动机电控单元输出信号采集结果为处理对象,从时域和频域两个方面提取电控信号特征,时域特征的提取向量包括:信号峰值、方根幅值、偏斜度等,信号峰值特征向量的提取结果为:

$$\tau_{\text{peak value}} = \frac{X_{\max}}{\left(\frac{1}{N_{\text{gather}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{gather}}} \sqrt{|X_i|} \right)^2} \quad (9)$$

其中: X_{\max} 为电控单元信号的最大值, X_i 为第 i 个信号采集结果, N_{gather} 为电控单元信号采集总量。另外方根幅值和偏斜度特征向量的提取结果为:

$$\begin{cases} \tau_{\text{Square root amplitude}} = \left(\frac{1}{N_{\text{gather}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{gather}}} \sqrt{|X_i|} \right)^2 \\ \tau_{\text{skewness}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{gather}}} (X_i - \bar{X})^3}{(N_{\text{gather}} - 1) \left(\sqrt{\frac{1}{N_{\text{gather}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{gather}}} (X_i)^2} \right)^3} \end{cases} \quad (10)$$

式中, \bar{X} 为电控单元信号的平均值。从频域角度上看,电控信号的能量值为:

$$E_{ij} = \int |X_A|^2 dt \quad (11)$$

式中, X_A 为混合动力发动机电控信号的离散点幅值^[19]。最终在考虑特征权值的情况下,对提取的电控信号特征进行融合处理,得出电控单元输出信号的综合特征,将其记为 τ_{con} 。

2.5 实现混合动力发动机电控单元检测功能

最终采用特征匹配的方式判断当前混合动力发动机电控单元是否存在故障状态,并确定故障类型,电控单元特征的匹配过程如下:

$$\begin{cases} s_i = \frac{\tau_{\text{con}} \cdot \tau_{\text{standard}}(i)}{\|\tau_{\text{con}}\| \cdot \|\tau_{\text{standard}}(i)\|}, \tau_{\text{standard}}(i) \in \tau \\ \tau = [\tau_{\text{Difficulty in starting}}, \tau_{\text{unstable idle speed}}, \tau_{\text{deviation}}, \tau_{\text{knockings}}] \end{cases} \quad (12)$$

若式 (12) 的计算结果高于阈值 s_0 ,说明当前混合动力发动机电控单元存在运行故障,运行故障类型与比对的特征标准一致,若计算得出 s_i 取值低于阈值,则证明当前特征标准对应的故障类型不属于发动机电控单元,如果当前电控单元信号与故障标准特征的匹配度均低于 s_0 ,则认为当前混合动力发动机电控单元不存在运行故障^[20]。在此基础上,针对存在故障的混合动力发动机电控单元的故障

点进行检测，最终将故障状态、故障类型、故障位置等参数的检测结果以可视化的形式输出，实现系统的混合动力车辆发动机电控单元检测功能。

3 系统测试

以测试优化设计基于动态模拟技术的混合动力车辆发动机电控单元检测系统的检测功能和性能为目的，在混合动力车辆发动机不同的运行状态下，利用优化设计系统对发动机电控单元进行检测，设计相应的系统测试实验。此次实验采用白盒测试的方式，在不同的发动机运行状态下，对发动机中内置电控单元的运行情况进行设置，在已知电控单元运行情况的基础上，利用检测系统得出发动机电控单元状态的检测结果，通过与设置真实值的对比，得出反映系统检测功能的测试结果，最终通过发动机不同运行场景下系统检测功能的比对，体现出系统的运行性能。

3.1 选择混合动力车辆发动机电控单元检测对象

混合动力车辆发动机电控单元由信号输入装置、电子控制装置、执行元件等部分组成，在此次实验中选择某混合动力车辆中 LFB11 型号的发动机电控单元作为检测对象。所有发动机电控单元通过导线将信号传递给各个传感器或执行元件，从而使电控单元正常工作。把发动机电控单元输出的线束先连接到试验台故障模拟设置电路中再接到原线束中，即将试验台串联到线路中。在实验开始之前，对准备的电控单元检测对象进行调试，保证电控单元在初始状态下均处于正常工作状态，保证电控单元状态设置任务的可操作性。

3.2 搭建系统运行与测试环境

优化设计系统以 Linux 为操作平台，选择 TestStand 作为测试执行管理软件。NITestStand 被用来开发，管理和实施测试程序。这一系列的测试都是用两种测试程序语言所写出的。测试顺序还对执行过程、报告产生、数据库输入以及与其它系统的联接进行标准化。NITestStand 能够与一系列软件实现无缝集成，同时还能将模块化的仪表、软切换等检测设备进行集成，为检测系统提供了一套完备的软件、硬件环境。

3.3 安装与调试硬件系统装置

根据检测系统硬件模块的优化设计结果，将相关设备元件安装在选择的发动机电控单元检测对象上，其中传感器设备的安装情况如图 4 所示。

按照上述方式完成对硬件系统中其他装置的实际安装。为保证硬件设备在实际检测工作中的正常运行，同时保证硬件设备之间及其与发动机之间的适配度，需要在开始实验之前对所有安装的硬件装置进行调试。在调试操作中，首先将所有的硬件设备切换至工作状态，随机发布一个执行指令，观察硬件设备的输出结果是否与预期结果一致，得出单一硬件设备的调试结果。在此基础上对硬件设备进行联合调试，判断处理器是否能够成功接收传感器输出信号，并得出相应的处理结果。若调试发现硬件设备存在故障或硬件设备之间存在不适配的情况，需要对相应设备进

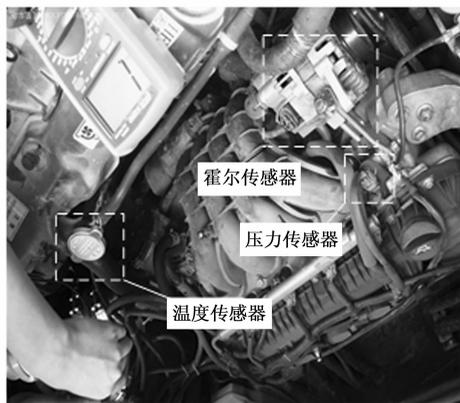


图 4 混合动力车辆发动机电控单元传感器装置安装实景

行重新连接，或替换对应的硬件设备，直至所有装置均调试成功为止。

3.4 动态模拟技术的应用

此次系统测试实验分别在发动机处于迟相、进相和调相状态下进行，迟相运行状态是指混合动力车辆发动机励磁模块处于过励磁状态，同时向发动机输送有功功率和无功率，此时功率因数为正。进相运行状态降低了发动机励磁电流，使发动机电势降低，发动机负荷电流产生助磁电枢反应，系统输送有功功率，此时发动机处于进相运行状态。而调相运行状态则是指发动机不发出有功功率，只是用来将感性无功功率输送到电网，从而对系统无功进行调节，维持系统电压水平。动态模拟技术的应用如下：

1) 首先，获取车辆电控单元的各种数据，及采集系数和传输系数 κ_{gather} 和 $\kappa_{transmission}$ ，根据发动机的控制目标计算电控单元的执行控制量。

2) 其次，控制量计算结果为内容生成控制指令，得出电控元件怠速不稳、电控单元运行偏差和电控单元爆震故障下电控单元的标准运行特征。

3) 最后，分别在上述实验场景下，采用人为设置与破坏的方式，对混合动力车辆发动机电控单元的实际运行状态进行设置，并记录电控单元的状态信息与故障位置信息，以此作为判断系统输出检测结果是否正确的比对标准。

利用动态模拟技术，模拟发动机电控单元检测样本在不同发动机运行场景下的工作状态，并通过系统软件功能的运行输出最终的电控单元检测结果，图 5 表示的是系统输出的第一个电控单元样本的检测结果。

为保证实验结果的可信度，实验共准备 800 个电控单元检测样本，将其划分成 8 组，每组实验的样本数量为 100 个，采用多组实验取平均值的方式，得出较为精准的实验结果。按照上述方式可以得出系统输出的其他发动机电控单元在不同场景下的输出结果。为体现出优化设计系统在检测功能方面的优势，设置传统的基于机器视觉的发动机电控单元检测系统和基于大数据的发动机电控单元检测系统作为实验的两个对比系统，在相同的实验环境下进行对



图 5 混合动力车辆发动机电控单元检测系统运行界面

比系统的开发, 并获得不同场景下电控单元的检测结果。

3.5 设置系统化测试指标

设置漏检率和误检率作为系统功能的量化测试指标, 其中漏检率主要用来检测系统是否能够将处于异常状态的所有电控单元成功检测出来 (漏检率指标为未检测出的异常数量与总数量比值), 而误检率则是判断系统检测输出的电控单元异常类型是否正确 (误检率为错误检出的异常数量与总数量比值), 上述指标的数值结果如下:

$$\begin{cases} \eta_{\text{missed detection}} = \frac{\text{num}_{\text{set}} - \text{num}_{\text{detection}}}{\text{num}_{\text{set}}} \\ \eta_{\text{false detection}} = \frac{\text{num}_{\text{error in type}}}{\text{num}_{\text{set}}} \end{cases} \quad (13)$$

式中, 变量 num_{set} 和 $\text{num}_{\text{detection}}$ 分别表示设置为异常状态的电控单元数量以及系统检测出处于异常状态的电控单元数量, $\text{num}_{\text{error in type}}$ 表示系统检测故障类型错误的电控单元数量。最终计算得出系统的漏检率和误检率越低, 证明对应系统的检测功能越优。

3.6 实验结果对比分析

3.6.1 迟相运行状态

统计混合动力车辆发动机迟相运行状态下, 系统输出的电控单元检测结果数据, 得出反映系统检测功能的测试结果, 如表 1 所示。

表 1 发动机迟相状态下系统检测功能测试数据表

实验组别	异常数量	基于机器视觉的发动机电控单元检测系统		基于大数据的发动机电控单元检测系统		基于动态模拟技术的混合动力车辆发动机电控单元检测系统	
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
1	100	99	2	100	1	100	1
2	98	95	1	97	2	98	1
3	100	98	2	99	1	100	0
4	100	97	2	98	1	99	0
5	100	96	3	99	1	100	1
6	99	94	5	96	2	99	0
7	100	96	4	98	1	100	1
8	100	98	1	99	2	99	0

- (1) 输出处于异常状态的电控单元数量/个;
- (2) 异常类型检测错误的电控单元数量/个。

将表 1 数据代入到公式 (13) 中, 计算得出发动机迟相运行状态场景下, 两对比系统对电控单元状态的平均漏检率分别为 3.12% 和 1.41%, 电控单元异常类型的平均误检率分别为 2.51% 和 1.38%, 而优化设计系统的漏检率和误检率平均值分别为 0.25% 和 0.50%。

3.6.2 进相运行状态

在混合动力车辆发动机进相运行状态下, 通过相关数据的统计, 得出系统检测功能的测试结果, 如表 2 所示。

表 2 发动机进相状态下系统检测功能测试数据表

实验组别	异常数量	基于机器视觉的发动机电控单元检测系统		基于大数据的发动机电控单元检测系统		基于动态模拟技术的混合动力车辆发动机电控单元检测系统	
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
1	100	96	5	98	2	100	1
2	98	95	3	97	2	98	0
3	100	98	2	98	1	100	1
4	100	94	2	98	2	100	0
5	100	96	3	99	1	100	1
6	99	94	5	95	2	99	0
7	100	95	4	98	3	99	1
8	100	98	1	99	2	99	0

- (1) 输出处于异常状态的电控单元数量/个;
- (2) 异常类型检测错误的电控单元数量/个。

通过公式 (13) 的计算得出 3 个系统的平均漏检率分别为 4.07%、1.93% 和 0.25%, 而平均误检率分别为 3.14%、1.88% 和 0.5%。

3.6.3 调相运行状态

重复上述操作, 通过数据统计与公式 (13) 的计算, 得出混合动力车辆发动机调相运行状态下系统对电控单元检测功能的测试对比结果, 如图 6 所示。

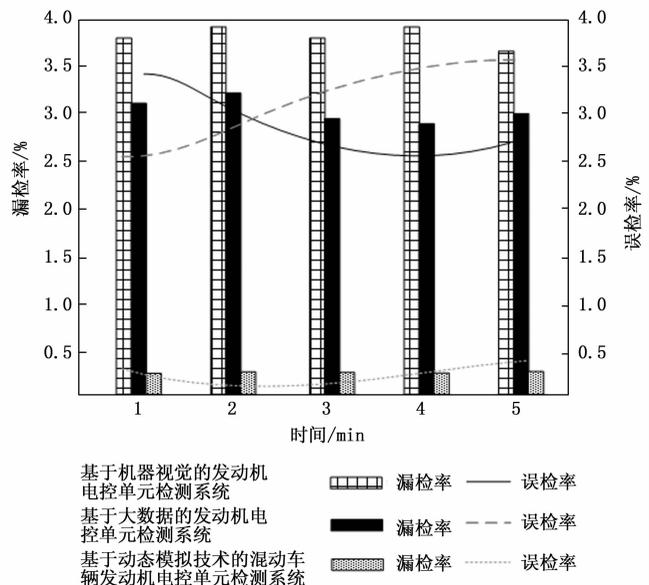


图 6 调相运行状态下系统对电控单元检测功能测试结果

(下转第 104 页)