

Design of Drive and Fault Diagnosis Strategy for Oxygen Sensor of Natural Gas Engine *

XIA Zhenxin¹, WU Changshui^{1*}, WANG Haifeng²

(1.School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;
2.School of Automotive Engineering, Qinghai Vocational And Technical College of Communications, Xining Qinghai 810003, China)

Abstract: Temperature control of oxygen sensor is an important condition for accurate feedback of air fuel ratio and an important means to improve fuel efficiency of engine. In this paper, based on the conventional temperature PID drive control, the oxygen sensor diagnosis control strategy is designed, including signal processing module, mode selection module and fault detection module. At the same time, based on the open controller, the PID control parameters are adjusted on the rapid prototype test bench. Finally conducted on a powerful gas engine bench experiment, the experimental results show that the designed control and diagnosis strategy can rapidly and accurately control temperature and monitor oxygen sensor state, make it more accurate response the steady state and transient air-fuel ratio, and it is concluded that the different temperature control accuracy of air-fuel ratio value.

Key words: natural gas engine; oxygen sensor; PID parameter tuning; fault diagnosis strategy; open controller
EEACC: 7310B; 7320T **doi:** 10.3969/j.issn.1004-1699.2021.11.002

天然气发动机氧传感器驱动及故障诊断策略设计 *

夏真新¹, 吴长水^{1*}, 王海峰²

(1.上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201600; 2.青海交通职业技术学院汽车工程学院, 青海 西宁 810003)

摘要: 氧传感器温度控制是空燃比精确反馈的重要条件, 是发动机提高燃料利用率的重要手段。本文在常规温度 PID 驱动控制的基础上, 设计了氧传感器诊断控制策略, 包括信号处理模块、模式选择模块及故障检测模块。同时基于开放式控制器, 在快速原型测试试验台上对 PID 控制参数进行整定。最后在一台大功率气体发动机上进行台架实验, 实验结果表明本文所设计的控制和诊断策略能快速准确地控制氧传感器温度, 监测氧传感器状态, 使其更准确地反应稳态和瞬态空燃比, 并得出了不同的温度控制精度对空燃比数值的影响。

关键词: 天然气发动机; 氧传感器; PID 参数整定; 故障诊断策略; 开放式控制器

中图分类号: TK437

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2021)11-1427-06

随着国六排放标准的出台, 使得各大厂商对汽车排放性能的要求日趋严格^[1], 而影响汽车排放性能最直接的因素就是空燃比。氧传感器是发动机空燃比控制中最重要的传感器, 它通过检测废气中的氧含量实时地将空燃比反馈给电控单元, 电控单元则根据上一时刻的空燃比调整下一时刻的喷气脉宽, 从而将空燃比控制在理论空燃比附近, 实现空燃比的闭环控制。发动机空燃比闭环能否取得预期效果, 直接取决于氧传感器能否快速、精确反馈空燃比, 特别是在发动机瞬态工况过程中^[2]。由于氧传

感器须工作在指定温度下, 而发动机频繁的工况转换导致的转速、喷油量变化, 以及不同进气量引起的混合气温度变化都会造成排气管中的温度差异。温度的变化会影响过量空气系数的测量精度, 继而影响空燃比的闭环控制。因此监测氧传感器的运行状况, 控制加热温度, 使温度稳定在某一固定值附近显得十分重要。

随着氧传感器的广泛使用, 国内外研究人员对氧传感器控制展开了研究。刘瑞祥等^[3]采用模拟电路设计了氧传感器控制器, 模拟 PID 电路控制泵

电流,但是这种方法参数调整不便,温度控制没有形成闭环;卢继飞^[4]等建立了传感器温度模块被控对象的数学模型,提出利用 PID 控制算法对温度进行控制,采用 Z-N 法进行参数整定,但超调量大、调节时间长,难以用于瞬态过程的准确控制;周树艳^[5]等提出了分段加热的控制方法,缩短了冷启动时间,但未给出参数整定方法及结果;合肥工业大学 DSP 实验室^[6-7]研制了基于 dSPACE 平台的氧传感器控制系统,采用分段加热控制算法控制温度克服了非线性问题,但传感器的冷启动加热时间较长。

针对上述应用中的一些不足,本文基于 LSU 4.9 型宽域氧传感器^[8]和 CJ125 控制芯片^[9],针对氧传感器的温度非线性特性和快速冷启动时的加热限制要求,采用了分段式加热^[10]和 PID 控制相结合的温度控制方法,对氧传感器温度进行闭环控制,并在快速原型测试试验台上进行 PID 控制参数在线自整定,缩短了温度控制时间,提升了动态性能。另外,本文设计了在线故障诊断策略,实时监测氧传感器状态和加热过程,在准确获取信号的同时,还可以起到保护作用。

1 宽域氧传感器工作原理

LSU4.9 型宽域氧传感器属于氧化锆型,其主要结构包括检测室、泵氧单元、能斯特单元、参考室以及加热组件五部分^[11]。高温状态时,氧化锆能把氧气电解成移动的氧离子。氧传感器工作时,参考室中氧浓度不变,废气中氧浓度则一直在变化。由电化学可知,浓度差产生电势差^[12]。ECU 将电压加在泵氧元上,把排气中的氧泵入检测室中,使电压维持在 0.45 V。施加在泵氧元上的电压,即为所需的氧含量信号。氧传感器据此电压计算出氧含量,从而测量出过量空气系数。由于氧化锆具有温度超过 350 °C,遇液态水易热冲击炸裂的物理特性,因此要精确控制温度。但氧传感器温度不可直接测量,需通过测量能斯特单元的内阻实现对温度的检测^[13],而后通过控制算法调节 PWM 的占空比,改变加热电压,实现氧传感器温度的升高和维持。氧传感器温度和内阻对应关系曲线如图 1。

2 氧传感器底层驱动

本文的控制器采用飞思卡尔 MPC5674F 作为主控芯片,博世 CJ125 作为氧传感器驱动芯片^[14]。两芯片间通过 SPI 总线进行通信。LSU4.9 氧传感器、主芯片 MPC5674F 以及 CJ125 驱动芯片之间的连接原理如图 2 所示,其中,IP 是氧传感器泵电流

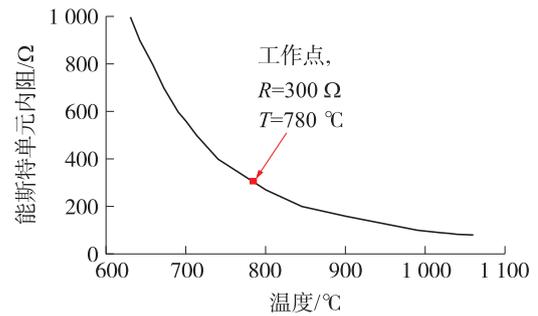


图 1 能斯特单元电阻特性曲线

输出运算放大器的反向输入端,由泵氧元产生的泵电流可以计算出过量空气系数大小;IA 为泵电流输出运算放大器的正向输入端,也叫调整电流端;VM 为虚地端;UN 为氧浓差电池内阻测量端,由这根引脚和 CJ125 驱动芯片相连,CJ125 由此得到最主要的 2 个信号,空燃比电压信号输出 UA 和温度测量信号输出 UR,根据 UA 可计算出过量空气系数,进而计算出空燃比^[15]。根据 UR 可计算出氧传感器当前工作温度,并将这一信号反馈给 ECU,对氧传感器的温度进行实时控制。

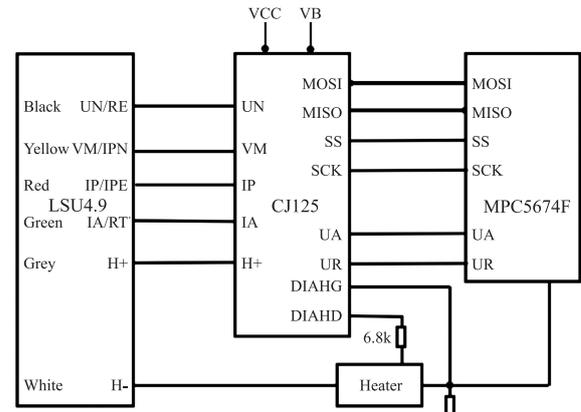


图 2 硬件连接原理

3 氧传感器加热控制策略设计

氧传感器从冷启动状态加热到工作状态,需经历三个阶段,小功率加热、全功率加热及温度维持阶段。这三个加热阶段需要由两个控制方式来进行控制,分别是开环控制 (OpenLoopControl) 和闭环控制 (ClosedLoopControl),本文设计的控制策略根据氧传感器所处状态选择控制方式,最终计算出加热占空比。当加热器被使能 (EnblHeater = 1) 时,判断此时氧传感器温度,如果氧传感器温度小于最佳氧传感器温度阈值 (HTRc_OptimalSensorTemp_apv),则进行开环控制,即 OpenLoopActv = 1;待氧传感器温度大于最佳传感器温度阈值后则进行闭环控制,即 OpenLoopActv = 0。

当采集的信号经过故障检测后,进入标定使能阶段,随后判断 SPI 和 OOR 故障标志位,若故障标志位全为 0,则会激活标定使能模式(EnblCalMode = 1),否则不激活(EnblCalMode = 0)。进入标定使能模式后,使能温度传感器,通过当前电压信号 UR 查表得出氧传感器温度。当温度传感器被使能并且 SPI 无错误标志位时,使能参考电流。同时,对故障进行监测,当传感器未达到使能加热器的温度时,只考虑短接到地、电源和开路故障,若无故障且参考电流被使能,则使能加热器。期间如果故障标志位非 0,则限制加热(HeaterLimit = 1),直到相应的故障标志位清除。加热控制使能策略的示意图如图 3 所示。

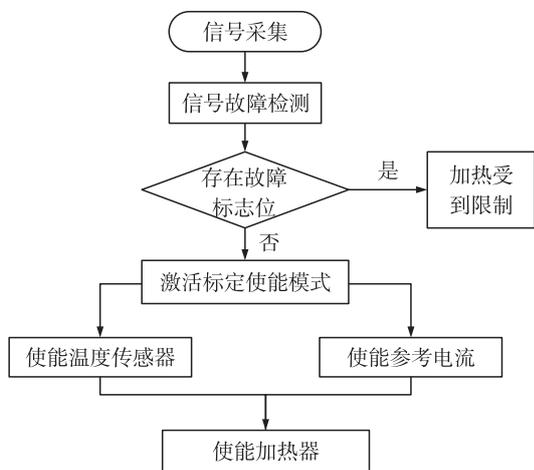


图 3 加热控制使能示意图

3.1 加热器开环控制策略设计

氧传感器从冷机状态启动,当加热器激活且氧传感器温度小于最佳温度阈值时,使能开环控制(OpenLoopActv = 1)。此时比较氧传感器温度和水凝结阶段温度,若传感器温度小于水凝结阶段温度,则进入水凝结阶段。此阶段初始加热占空比不能过大,需以较小且固定的占空比加热传感器^[16],这样可避免升温过快导致氧传感器陶瓷热应力过大而损坏。此外一旦进入水凝结阶段,加热占空比将会持续一固定时长,并且直到该子系统被再次触发之前不会再次进入此阶段。当水凝结阶段结束后且氧传感器温度大于一定阈值时,将会以 HTRc_LinRamp-PWMCmd_apv 为初值,HTRc_OpenLoopLinRamp_apv 为斜率线性增大占空比加热氧传感器。最终的加热占空比受蓄电池电压的影响,因此需要通过蓄电池电压查表得到一个修正因子,水凝结阶段的占空比和线性计算得到的占空比均需根据蓄电池电压乘上相应的修正因子才能得到最终的加热占空比 PWM-Cmd。在加热过程中,如果检测到故障的存在,即

HeaterLimit = 1,需要对 PWMCmd 进行限幅处理。图 4 为加热器开环控制策略。

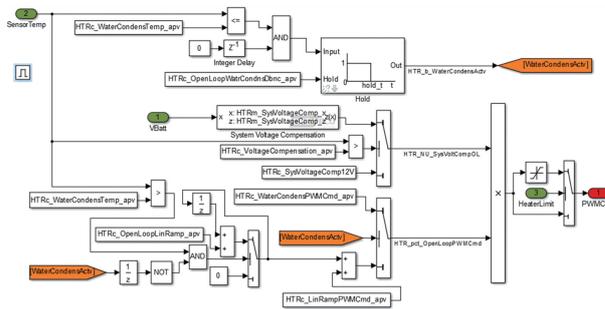


图 4 加热器开环控制策略

3.2 加热器闭环控制策略设计

经历小功率和大功率加热后,氧传感器温度迅速爬升,当氧传感器温度接近工作温度 780 °C 时,启动闭环控制。加热器通过温度信号电压值获取当前传感器的温度值,进一步与目标温度值进行比较,两值之间的误差反馈到输入端,分别在 PID 控制参数的 K_p 、 K_i 、 K_d 下实现闭环 PID 调节^[17],输出调节结果占空比 PWM 基本量。与开环控制相同,得到的 PWM 基本量需乘以根据蓄电池电压查表得到的修正因子才能得到最终的 PWMCmd。受排气温度的影响,输出的占空比实时变化。如果存在故障,即 HeaterLimit = 1,此外还需对 PWMCmd 进行限幅处理,这一过程持续进行。为使传感器稳定在设定温度点附近,氧传感器温度控制的响应性与准确性取决于 PID 控制参数,因此 PID 参数的选择尤为重要。

本文利用开放式 ECU 快速原型测试平台,采用基于 Z-N 法进行 PID 参数整定^[18]。当氧传感器闭环控制构建完成时,将 PID 控制器的积分和微分作用去掉仅留下比例作用,然后在系统中加入一个扰动,若系统响应是衰减的,则需增大控制器的比例增益 K_p ,重做实验,相反若系统响应的振荡幅度不断增大,则需要减小 K_p 。最终使闭环系统做临界等幅周期振荡的比例增益 K_p 就被称为临界增益,记为 K_u ;而此时系统的振荡周期被称为临界振荡周期,记为 T_u 。然后再根据经验公式求出 PID 控制器的参数整定值。加热器闭环控制策略如图 5 所示。

4 氧传感器驱动故障诊断策略设计

由于氧传感器需工作在稳定的温度区间,加热温度过高会损坏氧传感器,因此当检测温度过高时,应停止加热。加热一段时间后,温度未正常升高,也应停止加热。此外,硬件电路工作过程中,经常会出现开路、短路的电路故障,驱动芯片与主芯片间也会

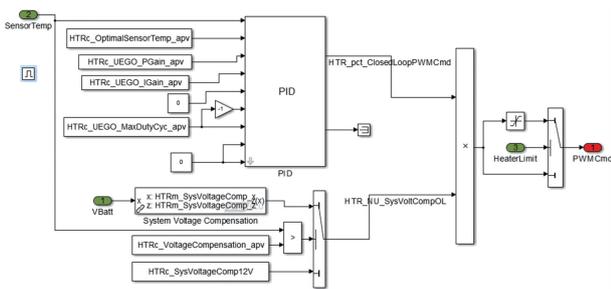


图 5 加热器闭环控制策略

出现 SPI 通讯故障^[19]。氧传感器的正常启动、工作是保证空燃比快速、精确反馈的重要前提,如果不能及时、准确的获取氧传感器信号来测量其温度,氧传感器就会处于失效状态,同时氧气含量及 Lambda 就无法获取,发动机空燃比闭环控制就不能正常进行,因此对氧传感器工作过程进行实时故障检测十分必要。具体的诊断策略如图 6 所示。

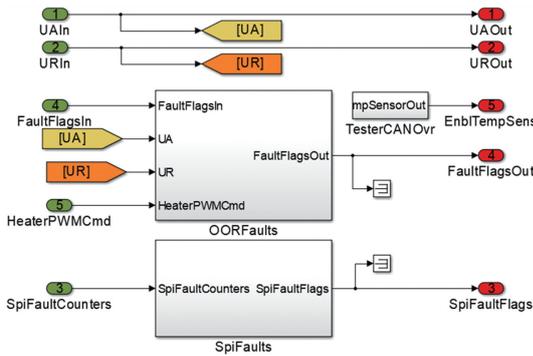


图 6 氧传感器驱动故障诊断策略

当 ECU 上电时,氧传感器接收电压信号和工作开启信号,通过 CJ125 控制芯片引脚产生 UA 和 UR 信号,主控芯片收到信号后,先对其进行一阶低通滤波,提高信号的稳定性,之后进行故障诊断。故障诊断分为两部分,其一是对 UA 和 UR 信号的诊断,其二是进行 SPI(串行外设接口)通讯故障诊断。

对于信号诊断,在初始状态时,此模块的故障状态输出为 0,即无故障状态。由于采集的信号为电压信号,首先对其进行限幅处理,将输入信号的物理电压值与标定的信号最大最小值进行比较。当 UA 值大于信号电压高限值(HTRc_UA_OORHi_apv)或小于信号电压低限值(HTRc_UA_OORLo_apv)成立,且处在此状态时间大于故障消除抖动时间,故障标志位置 1。如果在消除抖动过程中,UA 值又处于高、低限值之间,则故障标志位清零。同理,当 UR 值大于高限值或小于低限值,且处在此状态时间大于消除抖动时间,故障标志位置 1。若在消除抖动过程中,UR 值又处于高、低限值之间,则故障标志位清零^[20]。

当加热器 PWM 指令为高电平时,检查 UR 响应。当检测加热器 PWM 为高电平且 UR 大于加热的阈值电压,表示此时处于低温环境,加热器正在进行加热,若处于此状态时间大于信号抖动时间,表明加热器没有正确加热传感器,则设置故障标志位,该诊断有利于保护氧传感器探针。当故障出现时,PWM 指令会受到限制,整个工作过程中,PWM 指令实时受到故障检测结果的控制。与此同时,检测 UR 值是否小于加热阈值电压或加热信号 PWM 是否为 0,若符合,则此故障标志位自动清除。

对于 SPI 诊断,软件平台事先将值写入寄存器中,数据通过 CJ125 的 SPI 通讯进行传输,当出现数据传输错误时,重新读取该值,同时会对错误通讯消息进行计数,该计数器会递增到 255,直到计数器返回到软件平台重新装载为 0。同时,为了可以确定是否是暂时的 SPI 问题,使用泄露桶计数器原理:如果 SPI 存在错误数(非 0)且值增大,则会启动计数,计数器值会以一个权重增加,直到最大值 max,设置计数溢出标志。若 SPI 无错误数(为 0)则不会启动计数,或者错误数减小,则计数器值会以一个权重减小,计数溢出标志则会清除。因此,无论是计数器溢出标志为 1 或者 SPI 错误达到 255,均会设置故障标志位。如果 SPI 返回,则会清除此故障标志位。此外由于硬件电路经常会出现电路故障,需要实时的对连接氧传感器的各路引脚进行对地、电源短路以及断路检测,若出现故障,均会设置对应的故障标志位。

5 发动机台架应用试验

为验证本文所设计的宽域氧传感器加热控制策略的实际控制效果,将本策略在一台大功率天然气发动机 YC6G260N-50 上进行实际性能测试,其性能参数如表 1 所示,发动机台架布置如图 7 所示。

表 1 YC6G260N-50 发动机技术参数

燃料种类	CNG/LNG
气缸数/个	6
进气形式	增压中冷
气缸排列形式	直列
排量/L	7.8
排放标准	国 V
额定转速/(r/min)	2 300
最大马力	260
最大扭矩/(N·m)	950
最大扭矩转速/(r/min)	1 300~1 700
压缩比	11:1
缸径×行程/mm	112×132



图 7 发动机台架布置图

PiSnoop 主要用于参数优化,在控制系统运行过程中同时采集测量信号和标定参数值,并且可以提供图形化的检测与标定视图。

如图 8 所示,为故障监测标定界面,在快速原型测试中,分别给定一个 UR 低电压和 UR 高电压值信号,且使虚拟接地端 VM 开路,所设计的诊断策略能快速准确的检测到信号高低限故障与开路故障,并使故障标志位置 1。

Address	Value	Name	Type	Units	Description
4002831	0	HTR_b_EH_Open	UBYTE	b	DIN fuel flag from OE block for exte...
4002834	0	HTR_b_EH_ShirtGrnd	UBYTE	b	DIN fuel flag from OE block for exte...
4002835	0	HTR_b_EH_ShirtVbatt	UBYTE	b	DIN fuel flag from OE block for exte...
4002832	0	HTR_b_Salp_ShirtGrnd	UBYTE	b	DIN fuel flag from OE block for exte...
4002833	0	HTR_b_Salp_ShirtVbatt	UBYTE	b	DIN fuel flag from OE block for exte...
4002836	0	HTR_b_SpecCtrl	UBYTE	b	Fault flag from Spec override indication
4002837	0	HTR_b_UA_OORHi	UBYTE	b	Fault flag for OOR
4002841	1	HTR_b_UA_OORLo	UBYTE	b	Fault flag for OOR
4002838	0	HTR_b_Uin_Open	UBYTE	b	DIN fuel flag from OE block for Her...
4002840	0	HTR_b_Uin_ShirtGrnd	UBYTE	b	DIN fuel flag from OE block for Her...
4002842	0	HTR_b_Uin_ShirtVbatt	UBYTE	b	DIN fuel flag from OE block for Her...
4002843	0	HTR_b_Uin_OORHi	UBYTE	b	Fault flag for OOR
4002844	1	HTR_b_Uin_OORLo	UBYTE	b	Fault flag for OOR
4002845	0	HTR_b_Vm_Open	UBYTE	b	DIN fuel flag from OE block for vult...
4002846	0	HTR_b_Vm_ShirtGrnd	UBYTE	b	DIN fuel flag from OE block for vult...
4002847	0	HTR_b_Vm_ShirtVbatt	UBYTE	b	DIN fuel flag from OE block for vult...
4002848	0	HTR_b_SHPWM_NoResponse	UBYTE	b	Fault flag to indicate heater PWM s...

图 8 上位机标定软件故障监测状态

通过查询 LSU 4.9 的产品手册得知其最佳工作温度为 780 °C。在常规的空气环境下进行实验数据采集。图 9 为冷启动状态下加热占空比变化曲线,图 10 为冷启动状态下氧传感器温度变化曲线试验结果。

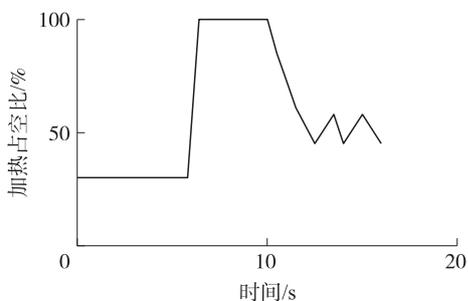


图 9 冷启动状态下加热占空比变化曲线

从图 9 中可看出,一开始进行冷启动预加热,进入开环加热阶段,占空比较小,以小功率进行,此时对应图 10 中氧传感器温度维持在 50 °C 左右,维持一段时间到达氧传感器露点温度,而后进入线性加

大占空比加热阶段,功率大大增加,氧传感器温度迅速上升。最后随着信号处理模块检测到氧传感器温度接近工作温度 780 °C 时,进入闭环加热阶段,占空比不断减小,温度上升速率减慢,然后占空比维持在一定的水平,此时对应氧传感器温度曲线近似为一条直线,其温度恰为最佳工作温度:约为 780 °C。

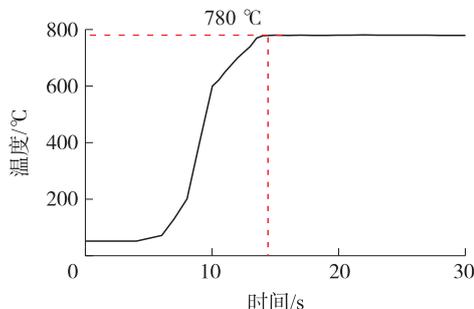


图 10 冷启动状态下氧传感器温度变化曲线试验结果

为进一步证明氧传感器温度控制策略的准确性,对发动机工况进行改变,监测过量空气系数的变化,变化情况如图 11。

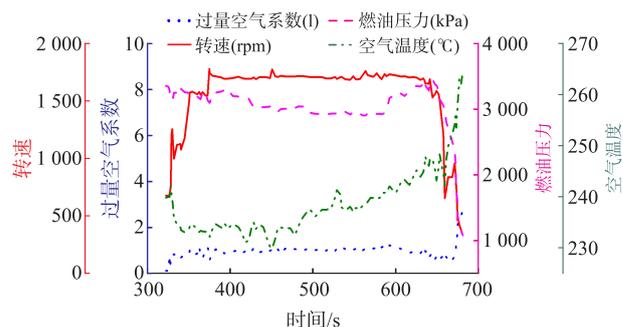


图 11 发动机工况状态变化试验结果

由图 11 可知,当发动机从启动工况过渡到稳态工况下,过量空气系数能得到迅速校正,并且这一过程过量空气系数稳定的效果较好。当从稳态工况中切换时,过量空气系数也能快速反应。与此同时,通过改变 PID 参数来反映温度的控制效果对过量空气系数的影响,试验过程中对过量空气系数数值监测。前后变化的试验结果如图 12,从图中可知,PID 参数变化后,温度闭环控制受到影响,进而使得过量空气系数的数值受到影响,响应速度和测量精度明

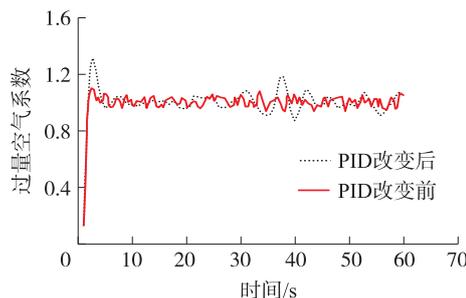


图 12 PID 变化前后过量空气系数变化试验结果

显下降。综合上述试验结果,本文所设计的氧传感器加热闭环控制策略具有良好的实际控制效果,精确度高。

6 结论

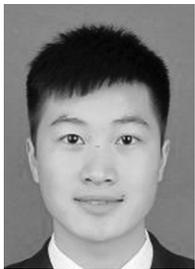
①分析了氧传感器加热控制原理、传感器与驱动芯片的硬件连接以及主从芯片间通信及信号传递关系,设计了氧传感器驱动及故障诊断策略。

②根据氧传感器的工作特点,采用基于模型的设计方法建立了加热温度开、闭环控制和故障诊断策略,使其在发动机常工况、变工况的条件下,都能有效检测出传感器的运行故障,并快速、稳定的工作在最佳状态,为空燃比控制精确的输出信号的测量值。

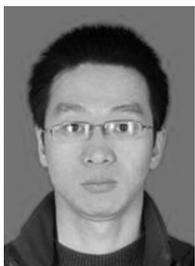
③基于开放式 ECU 进行了快速原型测试,并在大功率天然气发动机台架上进行了实际性能测试,试验结果表明,当发动机工况发生改变时,本文所设计的氧传感器加热控制策略收敛时间短,动态响应性好,能精准快速的控制温度波动,实时准确的反馈空燃比值。另外通过对比不同 PID 参数下过量空气系数的变化情况,验证了温度的控制效果影响了空燃比的测量精度,为下一步的空燃比数值的测量和修正提供了基础。

参考文献:

- [1] 吴向畅,石平,郭文军. 国六轻型车车载诊断系统开发[J]. 汽车工程学报,2020,10(1):28-30.
- [2] 胡春明,王暘,王齐英,等. 基于 BP 神经网络进气预估的汽油机瞬态空燃比控制研究[J]. 内燃机工程,2018,39(2):2-3.
- [3] 刘瑞祥,高希彦,杨德胜. 宽范围氧传感器控制器设计及在柴油机 EGR 系统中的应用[J]. 仪表技术与传感器,2004(2):7-8.

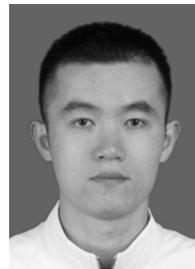


夏真新(1997—),男,现就读于上海工程技术大学车辆工程专业研究生二年级,主要研究方向为汽车电子、发动机电控,873574692@qq.com;



王海峰(1976—),男,现任青海交通职业技术学院副教授,主要从事汽车代用燃料及汽车道路试验的研究,86483244@qq.com。

- [4] 卢继飞. 发动机空燃比测量仪的研究[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院,2014;29-58.
- [5] 周树艳,陆召振,张雷. 宽域氧传感器加热方法及其控制电路[P]. 中国专利,105159359A.2015-12-16.
- [6] 张媛媛,徐科军,黄云志,等. 宽域废气氧传感器控制器的研究与实验[J]. 电子测量与仪器学报,2010,24(11):1060-1066.
- [7] 陈佳臻. 宽带废气氧传感器控制器研制[D]. 合肥:合肥工业大学,2010;37-56.
- [8] Robert Bosch GmbH. BOSCH Technical Product Information: Planar Wide Band Lambda Sensor LSU4.9 Y258E00015e[EB/OL]. <https://download.csdn.net/download/kklbbc/10597670>, 2005-06-14;2-13.
- [9] Robert Bosch GmbH. BOSCH datasheet CJ125 1279923679[EB/OL]. <https://download.csdn.net/download/catherinaced/12327190>, 2006-08-30;6-40.
- [10] 曾成. 氮氧传感器控制系统研究与设计[D]. 武汉:华中科技大学,2019;49-57.
- [11] 陈仁哲. 燃气发动机电控系统的软硬件开发[D]. 北京:清华大学汽车工程系,2011;38-39.
- [12] 叶龙伟,何小刚. 一种氧化锆氧传感器测氧系统的设计[J]. 仪表技术与传感器,2019,3(1):15-16.
- [13] 章晓娟,周坤,谢建军,等. 基于宽域氧传感器的空燃比分析仪设计与实现[J]. 传感器与微系统,2017,36(12):80-82.
- [14] 冒晓建,王军席,卓斌,等. 天然气发动机宽域氧传感器控制系统[J]. 农业机械学报,2013,44(1):1-5.
- [15] 李晓丽. 宽域氧传感器控制器设计与评测[J]. 工业技术创新,2017,4(2):120-122.
- [16] 周树艳,赵旻泓,靳越峰. 宽域氧传感器加热方法研究[J]. 现代车用动力,2020,3(1):30-32.
- [17] 王雨佳. 一类自适应 PD/PI 控制器设计及其应用[D]. 北京:北京交通大学电子信息工程学院,2019;10-12.
- [18] 黄友锐. PID 控制器参数整定与实现[M]. 北京:科学出版社,2010;8-14.
- [19] 漆正刚,曾广智,Gary Spring,等. 汽油车前氧传感器响应性能主动诊断策略研究[J]. 汽车工程,2015;37(10):1195-1200.
- [20] 王建海,方茂东,高继东. 汽油车车载诊断系统 OBD 基本原理及其应用[J]. 汽车工程,2006,28(5):491-494



吴长水(1978—),男,通讯作者、硕士生导师,现任上海工程技术大学副教授,主要研究方向为汽车电子、发动机电控,wuchangshui@sues.edu.cn;