

天然气发动机缸温闭环控制策略

徐凯峰

中国石油集团济柴动力有限公司, 山东 济南 250306

摘要:针对空燃比闭环控制天然气发动机的氧传感器故障率高、发动机控制不稳定的问题,以某 V 型 20 缸天然气发动机为研究对象,设计一种不受氧传感器制约的新的缸温闭环控制策略。分析缸温控制结构,设计缸温闭环控制模型和控制策略,标定优化发动机控制参数,并进行发动机实际运行试验验证。试验结果表明:开启缸温闭环控制后,在点火提前角相同的条件下,发动机标定功率达到 1 900 kW,各缸平均排温由 630 °C 降低至 623 °C,功率为 1 900 kW 时的热效率由 41.60% 提高到 42.15%,缸温闭环控制策略有效,提高了天然气发动机控制的稳定性,且整机性能有所提高。

关键词:天然气发动机;控制系统;缸温;闭环修正;标定

中图分类号:TK431

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)02-0053-07

引用格式:徐凯峰. 天然气发动机缸温闭环控制策略[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(2): 53-59.

XU Kaifeng. A closed-loop control strategy based on cylinder temperature of a natural gas engine [J].

Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(2): 53-59.

0 引言

目前,气体发动机燃料控制模式主要有开环控制、空燃比闭环控制两种模式^[1]。在实际应用中,开环控制模式结构简单,但控制精度较低,缺乏自动纠偏能力,当燃气成分发生变化或环境条件改变时,难以维持发动机在最优状态运行;空燃比闭环控制模式通过实时检测实际空燃比,并与设定空燃比进行比较,能够动态调整燃料供给,从而保证发动机始终工作在最佳空燃比状态。然而,该模式对氧传感器的依赖性较强,而氧传感器故障率较高,一旦氧传感器出现问题,空燃比闭环控制失效,系统被迫进入开环控制模式,导致控制性能下降。

本文中开发一种新的燃料控制模式——缸温闭环控制模式,该控制模式不受较故障率高的氧传感器制约,根据缸内燃烧情况对燃气流量进行实时修正,在不降低整机性能的前提下,提高天然气发动机控制的稳定性。

1 系统配置

以某 V 型、20 缸、四冲程、增压、中冷气体发动机为研究对象,发动机的主要参数及原性能指标如表 1 所示。

表 1 发动机主要参数及原性能指标

型号	缸径/mm	行程/mm	额定转速/(r·min ⁻¹)	额定功率/kW	单缸排温/°C	总排量/L	热效率/%
L20V190	190	255	1 000	1 900	≤650	144.6	≥40

收稿日期:2025-01-12

作者简介:徐凯峰(1989—),男,吉林松原人,工程师,主要研究方向为发动机控制系统设计标定,E-mail:xukaifeng@cnpc.com.cn。

发动机控制系统由大型发动机控制模块(large engine control module, LECM)控制器^[2]、监控仪、燃气控制阀、节气门、缸温采集器、点火线圈、火花塞、线束及各类传感器组成,可实现发动机的调速控制、空燃比控制、缸温闭环控制、点火控制、爆震控制等功能。

发动机控制系统框图如图 1 所示。其中,缸温采集器与 LECM 控制器之间通过控制器局域网总线(controller area network, CAN)通信进行数据交互^[3],缸温采集器将采集的缸温数据传输给 LECM 控制器进行可视化呈现并参与闭环控制。

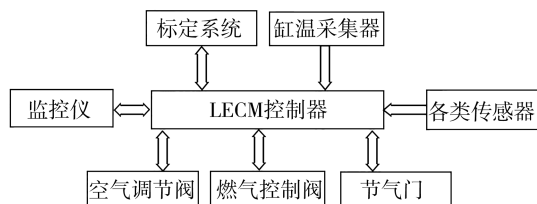


图 1 发动机控制系统框图

2 缸温闭环控制策略设计

2.1 结构布置

缸温控制部分主要由 LECM 控制器、缸温采集器、线束、缸温传感器组成^[4],在发动机上的整体布置如图 2 所示。

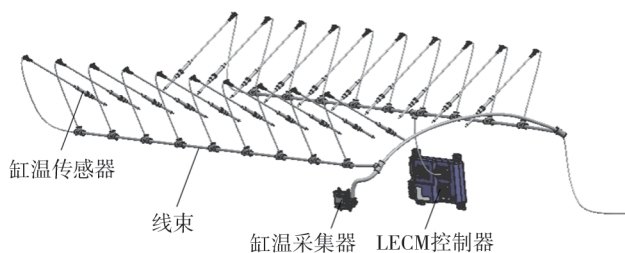


图 2 缸温控制结构布置

2.2 缸温闭环控制策略设计

2.2.1 缸温闭环控制模型

设计的缸温闭环控制模型如图 3 所示。其中,比例积分微分(proportional integral differential, PID)参数指经缸温修正的 PID 控制参数^[5],其数值影响修正的响应性;斜率设定指修正系数的变化速率,斜率越大变化越快;修正限值指燃气体积流量修正的阈值,超过该阈值后系统将不再进行偏差修正。

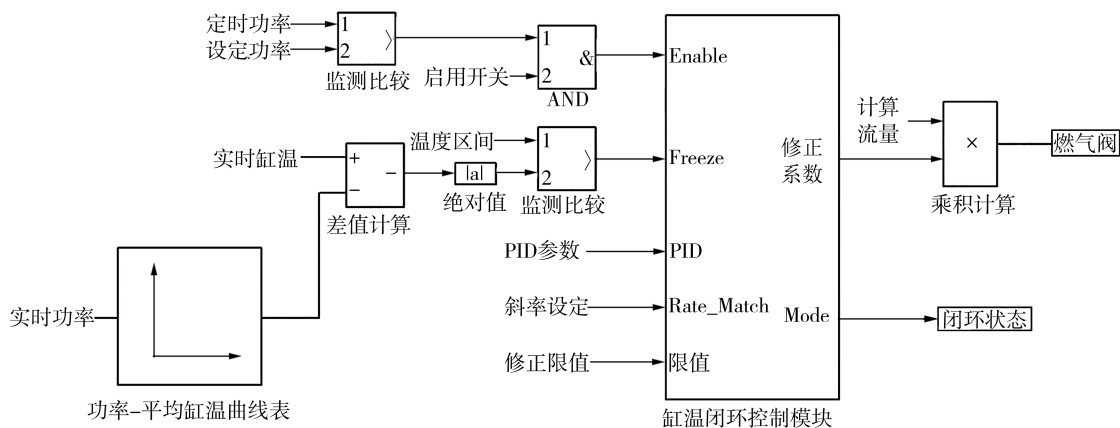


图 3 缸温控制模型

2.2.2 缸温闭环控制逻辑

1) 闭环控制启用。控制系统上电后,缸温采集器将缸温数据传输给 LECM 控制器;发动机起动运行,当实时功率超过设定功率后,LECM 控制器根据启用开关状态判断是否进入缸温闭环控制;启用缸温闭环控制后,LECM 控制器计算采集的缸温与基于功率-平均缸温曲线的缸温的差,当温差在设定的温度区间内,不进行燃气流量修正,当温差超出设定的温度区间,进行燃气流量修正。

2) 闭环控制计算。缸温闭环控制模块根据输入的数据进行内部计算,输出计算的燃气流量修正系数,根据燃气流量修正系数与发动机运行需求的燃气流量的乘积调节燃气控制阀进行燃气流量控制。

当进入缸温闭环控制模式时,可视化界面实时显示当前运行的闭环修正模式。为保障发动机的运行安全,缸温控制逻辑还包含高缸温报警及停机保护策略、低缸温报警、缸温偏差高报警及停机保护等策略^[6-8]。

3 发动机试验及分析

3.1 控制系统标定

试验前对控制系统进行静态标定,刷写缸温采集器软件和 LECM 控制器软件程序,检查并配置 LECM 控制器的缸温数据接收端口,确保接收缸温采集器采集的缸温。起动发动机前将控制器设为缸温开环控制模式。运行后测试缸温保护功能,在额定转速零功率时,参照实时各缸缸温,将缸温高报警及停机保护阈值设为比测量结果低 5℃,达到阈值触发缸温高报警及停机保护;再分别将缸温偏差高报警及停机保护阈值设为比测量结果高 5℃,达到阈值触发缸温偏差高报警及停机保护,确保缸温保护功能的有效性。基于发动机机械特性及速度-密度法控制原理对发动机进行标定^[9]。

根据速度-密度法,以 L/min 为单位的混合气最小体积流量的 $q_{V,\text{mix}}$ 数值^[10-11]

$$\{q_{V,\text{mix}}\} = \{q_{V,\text{gas}}\} + \{q_{V,\text{air}}\} = \{n\} \{V\} \{p_m\} \{T_0\} \eta / (k_1 \{p_0\} \{T_{\text{mat}}\}), \quad (1)$$

式中: $\{n\}$ 为以 r/min 为单位的发动机转速 n 的数值; $\{V\}$ 为以 L 为单位的发动机排量 V 的数值; $\{p_m\}$ 为以 kPa 为单位的进气压力 p_m 的数值; $\{T_0\}$ 为以 K 为标准状态下的气体热力学温度 T_0 的数值, $\{T_0\} = 273$; η 为充气效率; k_1 为调节因数,对于四冲程发动机, $k_1 = 2$; $\{p_0\}$ 为以 kPa 为标准状态下的大气压力 p_0 的数值, $\{p_0\} = 101.3$; $\{T_{\text{mat}}\}$ 为以 K 为单位的进气热力学温度 T_{mat} 的数值。

以 L/min 为单位的天然气体积流量 $q_{V,\text{gas}}$ 的数值

$$\{q_{V,\text{gas}}\} = \{n\} \{V\} \{p_m\} \{T_0\} \eta / [(1 + \lambda_{\text{st}} \lambda_{\text{des}}) k_1 \{p_0\} \{T_{\text{mat}}\}], \quad (2)$$

式中: λ_{st} 为当量比, λ_{des} 为过量空气系数。

发动机各个运行工况下的期望过量空气系数如表 2 所示,表中, $\{M\}$ 为以 kN·m 为单位的转矩 M 的数值。

表 2 发动机各个运行工况下的期望过量空气系数

转速/ (r·min ⁻¹)	期望过量空气系数										
	$\{M\} = 1$	$\{M\} = 2$	$\{M\} = 4$	$\{M\} = 6$	$\{M\} = 8$	$\{M\} = 10$	$\{M\} = 12$	$\{M\} = 14$	$\{M\} = 16$	$\{M\} = 18$	$\{M\} = 20$
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
250	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050
500	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050
600	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050
680	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050
730	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060
800	1.082	1.082	1.082	1.082	1.082	1.082	1.082	1.082	1.082	1.082	1.082
900	1.219	1.279	1.359	1.252	1.269	1.289	1.429	1.431	1.430	1.433	1.433
980	1.238	1.282	1.375	1.407	1.434	1.451	1.468	1.476	1.493	1.512	1.514
1 000	1.287	1.331	1.381	1.417	1.445	1.461	1.470	1.474	1.495	1.514	1.516
1 020	1.290	1.334	1.384	1.420	1.448	1.464	1.473	1.477	1.498	1.517	1.519
1 100	1.292	1.337	1.378	1.422	1.451	1.476	1.476	1.480	1.540	1.523	1.525
1 200	1.450	1.530	1.620	1.770	1.780	1.830	1.467	1.487	1.517	1.517	1.517
1 300	1.650	1.730	1.820	1.970	1.980	2.030	1.467	1.487	1.517	1.517	1.517
1 400	1.750	1.830	1.920	2.070	2.080	2.130	1.467	1.487	1.517	1.517	1.517

发动机各个运行工况下的充气效率 $\eta^{[12]}$ 如表 3 所示,表中, $\{p_m\}$ 为以 kPa 为单位的进气压力 p_m 的数值。 η 通过试验标定,标定初值设定 0.800~0.900,通过逐步标定优化达到最优。

表 3 发动机各个运行工况下的充气效率

转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	充气效率										
	$\{p_m\}=40$	$\{p_m\}=70$	$\{p_m\}=100$	$\{p_m\}=130$	$\{p_m\}=160$	$\{p_m\}=190$	$\{p_m\}=220$	$\{p_m\}=250$	$\{p_m\}=280$	$\{p_m\}=310$	$\{p_m\}=330$
0	0.891	0.891	0.891	0.891	0.891	0.891	0.891	0.891	0.891	0.891	0.891
250	0.842	0.842	0.842	0.842	0.842	0.842	0.842	0.842	0.842	0.842	0.842
500	0.780	0.780	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800
600	0.620	0.623	0.621	0.679	0.729	0.729	0.729	0.774	0.729	0.729	0.718
680	0.586	0.589	0.597	0.605	0.718	0.718	0.718	0.774	0.718	0.718	0.707
730	0.581	0.584	0.592	0.600	0.658	0.658	0.658	0.724	0.658	0.658	0.647
800	0.637	0.637	0.585	0.593	0.701	0.711	0.716	0.722	0.725	0.733	0.740
900	0.642	0.680	0.794	0.789	0.782	0.781	0.805	0.810	0.821	0.825	0.827
980	0.637	0.676	0.741	0.761	0.778	0.780	0.803	0.807	0.809	0.811	0.812
1 000	0.630	0.676	0.732	0.758	0.778	0.780	0.803	0.805	0.808	0.810	0.811
1 020	0.620	0.666	0.719	0.755	0.776	0.776	0.801	0.803	0.807	0.808	0.809
1 100	0.569	0.663	0.719	0.755	0.772	0.772	0.797	0.799	0.803	0.804	0.805
1 200	0.503	0.526	0.550	0.638	0.656	0.669	0.665	0.668	0.668	0.668	0.668
1 300	0.453	0.476	0.520	0.607	0.625	0.639	0.635	0.638	0.638	0.638	0.638
1 400	0.453	0.476	0.520	0.607	0.625	0.639	0.635	0.638	0.638	0.638	0.638

调整过量空气系数和 η 都影响进气体积流量,进而影响空燃比。标定过程中,因为发动机的机械性能已固定,过量空气系数标定完毕后基本不需要再调整,调整 η 即可,如果需要增大进气流量,就增大该工况的 η ,反之亦然。

调速控制标定是对 PID 参数进行标定^[13],PID 参数标定如表 4 所示,表中,比例项 K_p 是对当前转速偏差的响应,积分项 K_I 是对过去累积转速偏差的响应,微分项 K_D 是对未来转速偏差的预测。通过对不同工况点的 PID 控制参数进行标定,使发动机转速保持稳定。

通过标定控制系统的充气效率、调速 PID 参数等,可精准控制燃气控制阀,将转速波动控制在合理范围内,保证发动机运行在最佳工作状态。在发动机标定过程中,记录各个功率点的平均缸温,如表 5 所示。

表 4 PID 参数标定

功率/kW	K_p	K_I	K_D
100	0.05	0.20	80.0
600	0.50	0.20	80.0
1 200	1.00	0.20	80.0
1 800	1.50	0.20	80.0
2 200	1.80	0.20	80.0

表 5 功率-平均缸温表

功率/kW	平均缸温/ $^{\circ}\text{C}$	功率/kW	平均缸温/ $^{\circ}\text{C}$	功率/kW	平均缸温/ $^{\circ}\text{C}$	功率/kW	平均缸温/ $^{\circ}\text{C}$	功率/kW	平均缸温/ $^{\circ}\text{C}$
0	200	500	360	1 000	405	1 400	420	1 800	430
300	270	750	370	1 200	410	1 600	425	2 000	440

记录满负荷工况下发动机的性能参数,如表6所示。

表6 发动机满负荷性能参数

功率/kW	点火提前角/(°)	进气压力/kPa	各缸平均排温/℃	过量空气系数	热效率/%
1 900	28	270	630	1.562	41.6

3.2 缸温闭环标定试验

功率-平均缸温、闭环开启开关、闭环开启功率、修正限值、PID 参数、斜率、修正温度区间等参数都影响缸温闭环控制效果,应根据运行状况对这些参数进行标定,如图4所示,其中,功率、平均缸温应按照表5数据填写。

温度修正区间的设定影响缸温闭环控制功能的激活效果。考虑到缸温传感器存在固有的检测滞后性^[14],若温度修正区间标定过大,控制系统将无法及时响应温度变化,使闭环修正失效,控制系统等效于开环控制;若标定区间过小,将导致控制系统修正过快,发动机运行不稳定。

在缸温闭环控制标定试验过程中,应密切注意发动机运行状况。发动机以额定功率空载运行时,勾选闭环开启开关,设定缸温闭环开启功率、缸温修正限值,先将初始温度修正区间设定为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,为设定其他闭环参数预留有较大的裕量;逐步增大功率,观察发动机的运行状态,实时标定闭环修正参数,记录发动机运行数据。标定试验过程中,功率增加至1 330 kW时,发动机运行不稳,如图5所示。

发动机功率小于缸温闭环控制所需的最低限值时,将温度修正区间加大为 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,增大功率,根据发动机运行情况实时标定闭环修正参数,记录发动机运行数据。标定试验过程中,当功率增加至1 700 kW时发动机运行不稳,如图6所示。

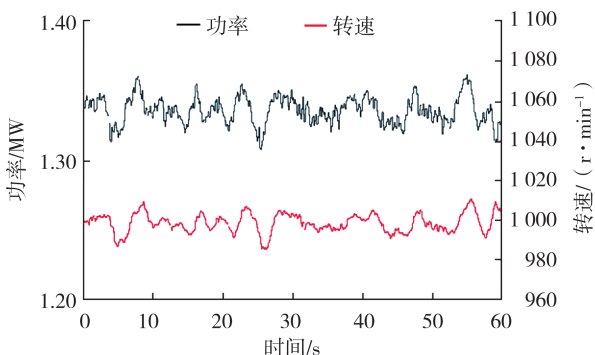


图5 温度修正区间为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时试验数据



图4 缸温闭环控制参数标定

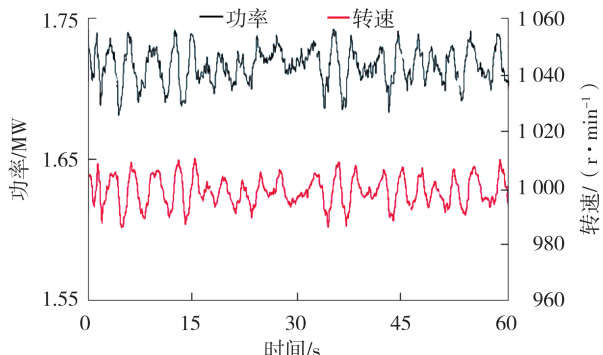


图6 温度修正区间为 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时试验数据

发动机功率再次小于缸温闭环控制所需的最低限值后,将温度修正区间扩展至 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,重新增大功率,根据运行情况实时标定闭环修正参数,记录发动机运行数据,结果显示功率增至额定功率时发动机运行平稳,如图7所示。

中冷器进水温度影响进气温度,由式(2)可知,进气温度影响天然气体积流量,从而影响各缸温度。发动机在额定功率工况运行稳定后,通过外部水管路阀门缓慢调整中冷器进水温度,监测发动机运行,发

现控制系统能够根据缸温的变化自动对燃气流量进行修正,使发动机稳定运行在设定的缸温区间。

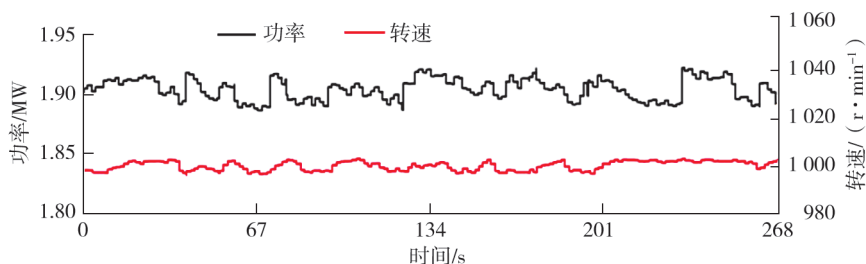


图 7 温度修正区间为 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时试验数据

标定试验结果表明:发动机控制系统可标定缸温闭环控制参数;启用缸温监测及闭环控制功能,通过实时监测各缸温度和排温数据可实现对各缸缸内燃烧情况的监测,同时根据燃烧情况修正发动机燃气流量,实现空燃比闭环控制,同时规避了氧传感器故障率高的缺点。

实际应用过程中,若缸温闭环修正达到修正限值后缸温仍未改善时,控制系统会在缸温偏差超出阈值后报警,同时联动触发控制器现有的故障降载功能,主动降低负载运行;若降低负载仍不能消除缸温偏差,控制系统将启动发动机停机保护功能,避免发动机出现严重故障,给予维护人员排查故障时间。

3.3 发动机运行试验

对采用缸温闭环控制策略的发动机进行实际运行试验,试验结果如表 7 所示。

表 7 发动机实际运行试验结果

转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	功率/ kW	点火提前角/($^{\circ}$)	进气压力/ kPa	执行器开度/%	各缸平均排温/ $^{\circ}\text{C}$	平均缸温/ $^{\circ}\text{C}$	过量空气系数	热效率/%
1 000	180	28	62	26.9	525	261	1.148	
1 000	450	28	95	38.1	548	353	1.374	
1 000	900	28	148	49.5	581	392	1.476	
1 000	1 350	28	215	54.5	599	415	1.551	
1 000	1 620	28	240	58.5	614	428	1.578	
1 000	1 900	28	275	66.4	623	435	1.582	42.15

由表 6、7 可知:开启缸温闭环控制后,在点火提前角相同的条件下,发动机标定功率达到 1 900 kW,各缸平均排温由 630 $^{\circ}\text{C}$ 降低至 623 $^{\circ}\text{C}$,功率为 1 900 kW 时的热效率由 41.60%提高到 42.15%,在不降低整机性能的前提下,提高了天然气发动机控制的稳定性。

4 结论

针对采用空燃比闭环控制的天然气发动机氧传感器故障率高、发动机控制不稳定的缺点,以某 V 型 20 缸发动机为研究对象,设计基于缸温监测的新型闭环控制策略。

1) 发动机控制系统由 LECM 控制器、监控仪、燃气控制阀、节气门、缸温采集器、点火线圈、火花塞、线束及各类传感器组成,可实现发动机的调速控制、空燃比控制、缸温闭环控制、点火控制、爆震控制等功能。缸温控制部分主要由 LECM 控制器、缸温采集器、线束、缸温传感器组成。

2) 建立缸温闭环控制模型和并制定控制策略,通过发动机实际运行试验验证其有效性。结果表明:在点火提前角相同的条件下,发动机标定功率达到 1 900 kW,各缸平均排温由 630 $^{\circ}\text{C}$ 降低至 623 $^{\circ}\text{C}$,热效率由 41.60%提高到 42.15%,缸温闭环控制策略有效,在不降低整机性能的前提下,提高了天然气发动机控制的稳定性。

参考文献:

- [1] 赵春生,刘江伟,顾维东,等.天然气发动机空燃比控制与试验研究[J].内燃机与配件,2021(4):1-5.
- [2] 张晖,郭进举,董占春,等.E6控制系统在天然气发动机上的应用[J].内燃机,2020,36(2):51-53.
- [3] 陆祖委.基于零部件的CAN网络测试研究[J].时代汽车,2023(8):153-155.
- [4] 姜绍君.热电偶测温电路的设计与仿真[J].电子测试,2019(15):36-37.
- [5] 胡昊,王海群.导热油炉前馈-反馈PID温度控制系统[J].工业炉,2024,46(5):64-66.
- [6] 张添栋,杨春社.天然气发动机缸温偏高原因分析与处理[J].中国设备工程,2006(5):34-35.
- [7] 李耀产.天然气发动机缸温温差大故障分析及处理[J].中国设备工程,2015(3):60-61.
- [8] 刘福刚,李红旗,王建鑫,等.瓦克夏 L7042GSI 天然气发动机缸温低故障诊断[J].设备管理与维修,2023(18):83-85.
- [9] 刘晓群,何太碧,王意东.天然气发动机电控系统标定过程的研究[J].内燃机,2012,28(6):24-27.
- [10] 徐凯峰,郭进举,李治朋,等.瓦斯发动机气源波动适应性分析及改进[J].内燃机与动力装置,2024,41(2):72-77.
- [11] 黄英杰,王谦,芮璐,等.过量空气系数对柴油引燃高压直喷式天然气发动机的影响[J].通信电源技术,2019,36(7):12-16.
- [12] 樊伟.影响发动机充气效率的因素及提高方案[J].汽车实用技术,2021,46(9):231-233.
- [13] 王以飞,李辉春,康雷朋,等.浅谈PID控制对气体发动机瞬态响应的影响[C]//浙江省科学技术协会.内燃机科技(企业篇):中国内燃机学会第六届青年学术年会论文集.杭州:浙江省科学技术协会,2015:296-299.
- [14] 高爱民,爰建军,于国强,等.K型热电偶动态特性试验与建模分析[J].中国电力,2016,49(10):12-16.

A closed-loop control strategy based on cylinder temperature of a natural gas engine

XU Kaifeng

CNPC Jichai Power Co., Ltd., Jinan 250306, China

Abstract: In response to the high failure rate of oxygen sensors and unstable engine control in natural gas engines with closed-loop control of air-fuel ratio, a new closed-loop control strategy based on cylinder temperature without the constraint of oxygen sensors is designed for a V-type 20 cylinders nature gas engine. The cylinder temperature control structure is analyzed, a closed-loop control model and control strategy based on cylinder temperature are designed, the engine control parameters are calibrated and verified by engine operation tests. The experimental results show that with the closed-loop control based on cylinder temperature, under the same ignition advance angle, the engine calibration power reaches 1 900 kW, the average exhaust temperature of each cylinder decreases from 630 °C to 623 °C, and the thermal efficiency increases from 41.6% to 42.15% when the power is 1 900 kW. The closed-loop control strategy based on cylinder temperature is effective, which improves the stability of natural gas engine control and enhances overall performance.

Keywords: nature gas engine; control system; cylinder temperature; closed-loop correction; calibration

(责任编辑:臧发业)