

国六柴油机进气流量控制策略优化

郭冬雪,潘伟,庄明超,李静静,张成伟

潍柴动力股份有限公司,山东 潍坊 261061

摘要:为解决国六柴油车进气流量(mass air flow,MAF)传感器测量偏差引起的误判,分析 MAF 测量原理及控制逻辑,进行台架试验和故障车辆实际路谱分析;选择颗粒捕集器再生工况对 MAF 传感器与进气压力传感器(barometric pressure sensor,BPS)进行校验,优化 MAF 的控制逻辑。对优化后的 MAF 控制逻辑进行实际运行验证。结果表明:MAF 测量偏差是引起车辆动力不足等故障的原因。MAF 控制逻辑优化后,由 MAF 传感器测量偏差引起的误判故障率从 31.9%降低到 3.3%。该控制策略能有效解决由 MAF 传感器测量偏差引起的误判故障,提高发动机可靠性。

关键词:国六柴油机;EGR;MAF;BPS;控制策略

中图分类号:TK421

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)03-0029-06

引用格式:郭冬雪,潘伟,庄明超,等.国六柴油机进气流量控制策略优化[J].内燃机与动力装置,2022,39(3):29-34.

GUO Dongxue, PAN Wei, ZHUANG Mingchao, et al. Optimization of control strategy of intake flow for CHINA VI diesel engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022,39(3):29-34.

0 引言

重型柴油机排放标准已升级到国六阶段,废气再循环(exhaust gas recirculation,EGR)-氧化催化器(diesel oxidation catalyst,DOC)-颗粒捕集器(diesel particulate filter,DPF)-选择性催化还原(selective catalytic reduction,SCR)技术是国六柴油机控制排放的主流技术路线,其中 EGR 系统中通常采用进气流量(mass air flow,MAF)传感器测量进气质量流量^[1]。MAF 传感器测量方式的特点是传感器(管路)与标定数据绑定,一管一标,同一台发动机,即使更换了相同批次的整车进气管路,也需要对 MAF 传感器重新标定。如果 MAF 传感器标定不准确,进气量测量出现偏差,影响 EGR 阀开度,进而影响发动机喷油及燃烧特性,可导致车辆动力不足、冒黑烟、DPF 过载等故障。

MAF 传感器与进气压力传感器(barometric pressure sensor,BPS)一般布置在进气管路。MAF 传感器用于测量 EGR 系统新鲜空气流量,一般选用热膜式传感器;BPS 用于测量总的进气歧管压力^[2],BPS 测得的压力数据经电子控制单元(electronic control unit,ECU)换算为进气量。MAF 传感器与 BPS 的测量位置不同,因此只能在一些特殊工况中实现 2 个传感器进气流量的校验。

据统计,采用 EGR 的国六柴油机发生的动力不足或冒黑烟等故障中,30% 以上是由 MAF 传感器测量偏差导致,但是市场维修人员往往按惯性思维优先检测排查 DPF、喷油器等零部件^[3-4],忽略 MAF 传感器标定,造成故障误判。为解决 MAF 传感器测量偏差引起的误判故障,分析 MAF 传感器测量原理及控制逻辑,本文中选取 DPF 再生工况下,通过对 MAF 传感器与 BPS 进行进气流量校验,优化 MAF 控制逻辑,解决 MAF 传感器标定偏差。

收稿日期:2021-12-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB3503205)

第一作者简介:郭冬雪(1987—),女,山东淄博人,硕士,工程师,主要研究方向为国六发动机整机设计,E-mail:guodx@weichai.com。

1 MAF 传感器

1.1 物理结构及安装位置

MAF 传感器由壳体、热膜、温度传感器、控制电路板、电连接器金属防护网等构成^[5]。传感器壳体两端设置与进气道相连接的圆形连接接头,空气入口和出口都设有防止传感器受到机械损伤的防护网。传感器入口与空气滤清器一端的进气管连接,出口与节流阀体一端的进气管连接。MAF 传感器结构示意图如图 1 所示。

EGR 路线国六柴油机进气系统主要包括空气滤清器、MAF 传感器、进气节流阀、EGR、BPS、增压器、中冷器等。BPS 一般位于气缸之前的进气管路上,MAF 传感器与 BPS 在进气管路中的布置位置如图 2 所示。MAF 传感器的测量精度受整车管路影响,当车辆的进气管路布置发生变化时,MAF 传感器必须重新进行标定。

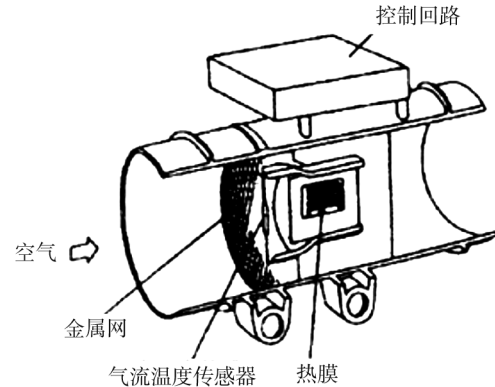


图 1 MAF 传感器结构示意图

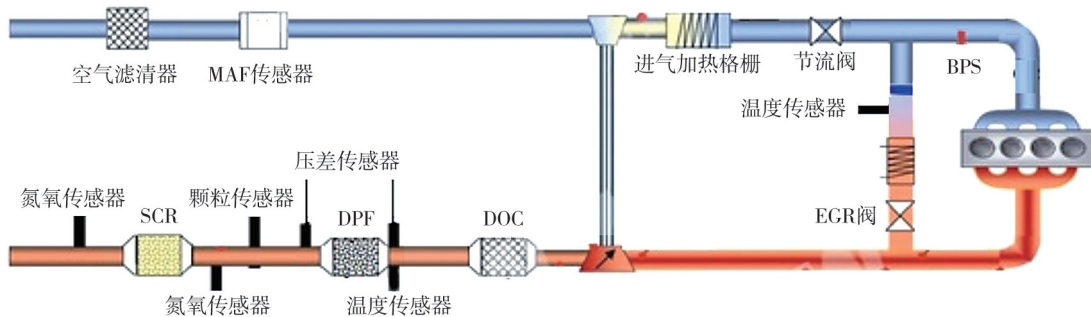


图 2 MAF 传感器与 BPS 位置示意图

1.2 工作原理

MAF 传感器的内部电路连接成电桥电路,热膜电阻 R_H 和温度补偿电阻 R_T 分别连接到电桥的一个臂上,电桥各个臂的电流由控制电路 A 控制,如图 3 所示。

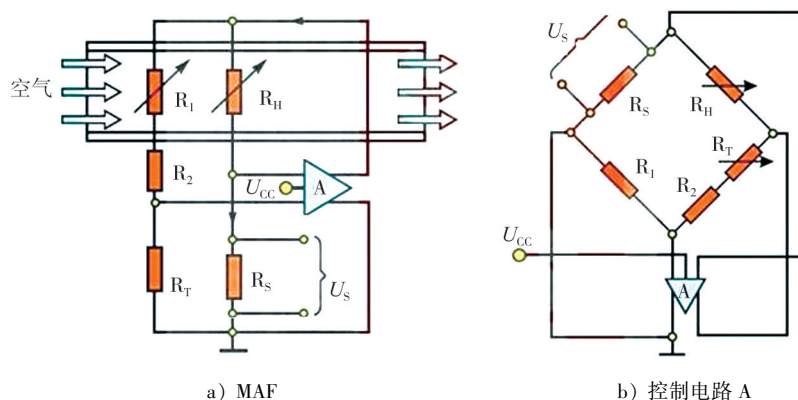


图 3 MAF 传感器工作原理图

电桥电压平衡时,控制电路供给 R_H 的电流 I_H ($I_H = 50 \sim 120 \text{ mA}$) 使其温度 T_H 保持恒定,供给 R_T 的电流使 T_H 与 T_T (R_T 的温度) 之差保持恒定。当空气流经 R_H 和 R_T 时, T_H 与 T_T 降低,电阻减小。 R_H 的电

阻减小,电桥电压失去平衡,控制电路将增大 I_H 使其温度保持恒定。电流的增加取决于 R_H 受到冷却的程度,即取决于流过 MAF 传感器的空气量。当电桥电流增大时,取样电阻 R_s 的电压升高,从而将空气流量的变化转换为 R_s 的信号电压 U_s 的变化。由于电阻为线性元件,因此 U_s 将随空气流量的变化而线性变化, U_s 输入电子控制单元 ECU 后,ECU 便可根据 U_s 计算空气流量^[6]。

1.3 MAF 控制策略

MAF 传感器控制策略如图 4 所示。EGR 路线国六柴油机主要通过 MAF 传感器测量值与模型计算的 MAF 需求值进行比例积分微分 (proportional integral differential, PID) 调节控制,最终控制 EGR 开度,其中:MAF 测量值主要通过 MAF 传感器测量电压,再换算成新鲜空气进气质量流量;MAF 模型值是通过 BPS 处的换算进气量与 EGR 设定废气流量的差;EGR 废气流量根据当前工况的发动机转速、喷油量从设定 EGR 率主 map 中查得,再经过高原修正、进气温度修正后得到。以 EGR 阀实际开度作为前馈值,与 MAF 模型值比较之后计算出的 EGR 设定值作为后馈值,实现 EGR 开度的闭环控制。

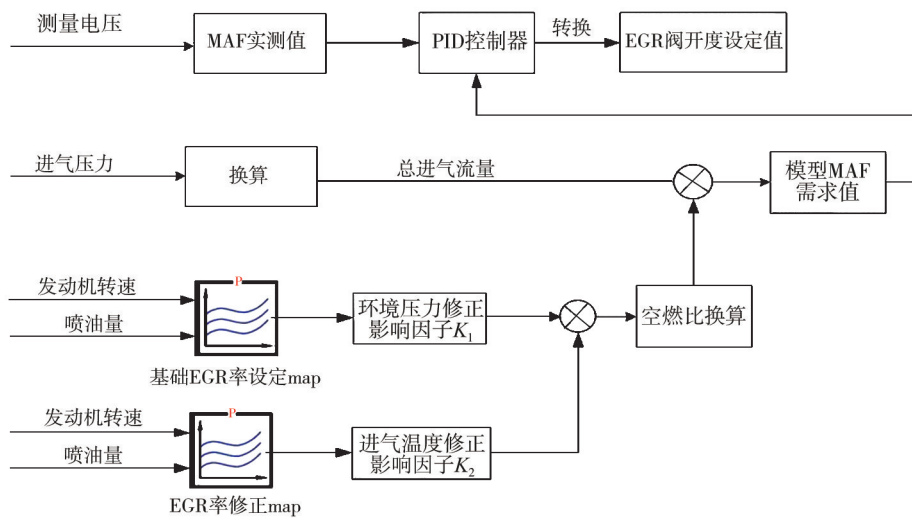


图 4 MAF 控制策略

2 MAF 测量偏差的影响

由 MAF 控制策略可知,MAF 控制偏差直接影响发动机进气系统 EGR 阀的开度,从而影响发动机进气量,间接影响发动机喷油及燃烧性能,最终影响发动机动力性、经济性^[7-8]。国六车辆实际运行中,MAF 标定不准导致车辆动力不足、冒黑烟、DPF 过载的故障频发。

2.1 台架试验

通过发动机台架试验,验证 MAF 偏差对发动机排放影响^[9-10]。选择瞬态测试循环(world harmonized transient cycle, WHTC)工况,控制发动机 MAF 相对实际值与设定值的不同偏差范围,验证 MAF 测量偏差对柴油机 NO_x 及 soot 排放的影响^[11]。相对偏差为 MAF 传感器测量和模型计算进气量之差的绝对值与 MAF 传感器测量结果的比。BPS 测得的进气流量受到进气节流阀开度、EGR 阀开度的影响,因此为精确控制 BPS 与 MAF 传感器测量偏差,试验过程中通过数据标定始终将发动机进气节流阀保持全开状态,而 EGR 阀保持常闭状态。

MAF 测量相对偏差对 NO_x 及 soot 排放影响的台架试验结果如图 5 所示。由图 5 可知,当进气量相对偏差向正、负方向逐步增大时 NO_x 及 soot 排放

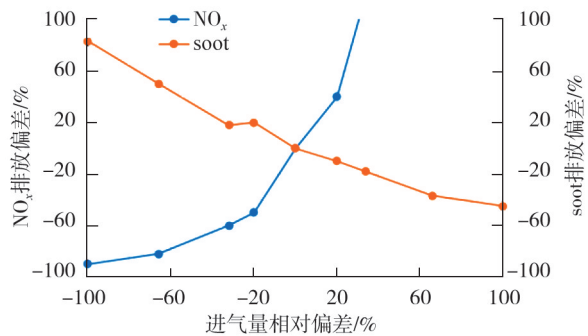


图 5 MAF 测量相对偏差台架试验排放影响

相对偏差波动很大,当MAF偏差为20%时, NO_x 排放偏差高达45%,soot排放偏差为20%。只有精准控制MAF偏差才能将 NO_x 及soot排放偏差控制在 $\pm 10\%$ 以内。所以,要确保车辆排放达标,需严格控制MAF测量准确性。

2.2 实际故障路谱

市场上某国六车辆存在动力不足、DPF过载及车辆冒黑烟的故障。为查明故障原因,首先对车辆进行常规检查:1)检查车辆油品正常,滤清器滤杯内油品清澈,取样化验正常;2)检查气门间隙无异常;3)检查喷油器,通过博世试验台校正喷油器无异常;4)检查进、排气管路,不存在漏气、吸瘪情况,进气压力显示正常;5)检查后处理系统压差传感器,电压均正常。

进一步采集故障车辆发动机路谱,故障路谱分析如表1所示。

表1 故障路谱分析

踏板开度/%	进气质量流量/($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)		相对偏差/%	踏板开度/%	进气质量流量/($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)		相对偏差/%
	测量	模型计算			测量	模型计算	
0	40	56	28.57	50	235	291	19.24
5	67	87	22.99	60	246	303	18.81
10	90	122	26.23	70	260	330	21.21
20	120	156	23.08	80	267	343	22.16
30	161	207	22.22	90	270	352	23.30
40	216	276	21.74	100	272	369	26.29

由表1可知,MAF传感器实测进气流量均小于模型计算流量,相对偏差为18.81%~28.57%。通过手动标定,使MAF传感器实测和模型计算进气流量一致,故障得以解决。台架试验及市场实际故障均表明MAF测量偏差过大可导致车辆动力不足、DPF过载及车辆冒黑烟等。

3 优化与验证

BPS与MAF传感器的安装位置不同,MAF传感器实测进气流量与BPS传感器换算进气流量都受发动机进气节流阀开度、EGR阀开度的影响。

3.1 DPF主动再生工况的MAF校验

国六车辆运行过程中,当DPF碳载量超过 4 g/L 时,DPF需要进行主动再生,后处理碳氢喷嘴向后处理系统中喷射柴油,在高温条件下氧化燃烧,清除积碳。DPF再生各阶段示意图如图6所示。驻车再生主要分为4个阶段:加热一阶段、加热二阶段、再生喷油阶段、排气冷却阶段。4个阶段特征明显,每个阶段转速稳定,进气节流阀全开,EGR阀关闭,此时可以实现MAF传感器和BPS进气流量的校验,若两者偏差较大,校验不通过,报出故障。

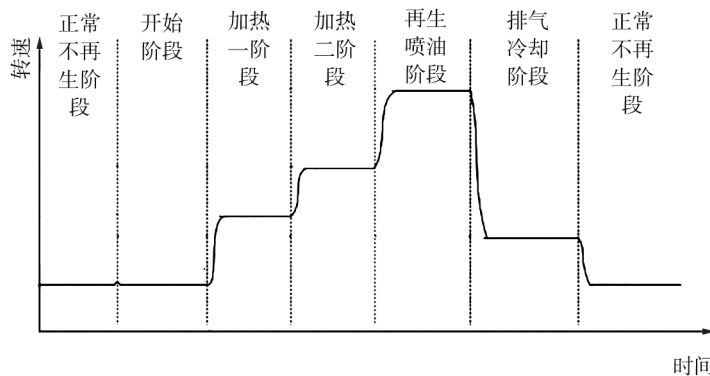


图6 DPF再生各阶段示意图

3.2 优化MAF控制逻辑

发动机在原有数据的基础上,增加MAF标定偏差故障的报错,减少对故障的误判。通过优化MAF控制逻辑,在MAF控制逻辑的基础上增加对发动机运行模式的判断,发动机运行模式包含一般运行模

式、SCR 加热模式、DPF 再生模式、高原运行模式、高寒运行模式等。MAF 标定偏差故障报出需同时满足 2 个条件:1)发动机处于 DPF 再生运行模式,当发动机处于 DPF 再生状态,进气节流阀全开,EGR 阀关闭,此时 MAF 传感器和 BPS 传感器进气流量理论上是一致的,才具有比较价值;2)MAF 传感器实测进气量与 BPS 换算进气量差的绝对值与 MAF 传感器实测进气量的比值超过 10%。当同时满足以上 2 个条件,ECU 报出 MAF 标定偏差大的故障,点亮仪表故障灯,同时 ECU 主动对车辆进行限扭限速。在特定工况下通过对 MAF 标定校验,可以迅速锁定故障原因,防止故障进一步恶化引发 DPF 过载、冒黑烟等其他故障。

3.3 实车试验验证

在某国六 EGR 车辆上对 DPF 驻车再生工况下的 MAF 控制策略进行满足控制要求优化验证,结果如表 2 所示。由表 2 可知,采用优化后的 MAF 控制策略,MAF 测量相对偏差均不超过 10%。

表 2 优化 MAF 控制逻辑实车验证结果

工况	进气质量流量/(kg·h ⁻¹)		偏差/ (kg·h ⁻¹)	工况	进气质量流量/(kg·h ⁻¹)		偏差/ (kg·h ⁻¹)
	测量	模型计算			测量	模型计算	
1	55.00	52.25	2.75	6	195.50	187.75	7.75
2	62.75	60.00	2.75	7	224.50	220.25	4.25
3	91.25	91.00	0.25	8	286.50	281.25	5.25
4	124.00	121.75	2.25	9	310.00	308.50	1.50
5	164.00	159.00	5.00	10	357.25	361.50	-4.25

3.4 市场验证

将优化 MAF 逻辑刷写到国六车辆中,在深圳地区试运行,统计对比前、后 3 个月 MAF 传感器误判故障情况,结果如表 3 所示。

表 3 逻辑优化前后故障数对比

故障类型	前 3 个月数据			采用优化逻辑后 3 个月数据		
	数量	MAF 误判数量	误判率/%	数量	MAF 误判数量	误判率/%
DPF 过载	132	29	22.0	86	0	0
动力不足	203	69	34.0	133	6	4.5
油耗高	168	50	29.8	89	5	5.6
冒黑烟	32	20	62.5	10	0	0
排放超标	126	43	34.1	102	3	2.9
合计	661	211	31.9	420	14	3.3

由表 3 可知,优化 MAF 控制逻辑后,由 MAF 测量偏差过大引起的故障误判率由 31.9%降低到 3.3%。实车试验验证和实际市场验证均表明优化后的 MAF 传感器控制策略可行有效,可减少 MAF 测量偏差引起的误判率。

4 结语

MAF 测量进气量的准确性和发动机燃烧息息相关,直接影响 EGR 率,从而影响喷油量以及 DPF 的积碳速率。本文中解析并优化 MAF 控制策略,及时对 MAF 传感器测量偏差进行监控,使 MAF 偏差引起的误判故障率由 31.9%降低到 3.3%,减少了 MAF 测量偏差引起的误判率,提高了发动机可靠性。

参考文献:

- [1] 袁帅,王贺春,李禹函,等. EGR 技术对柴油机性能的影响[J]. 应用技术,2018(3):155-159.
- [2] 徐君材. 发动机为何同时安装 MAF 和 MAP [J]. 汽车维修与修理,2014(11):76-77.
- [3] 马洪新. 热线式空气流量传感器故障检测分析[J]. 汽车科技,2019(6):65-69.
- [4] 王英敏. 基于融合模型的柴油机空气管理系统故障诊断[J]. 科学技术与工程,2020(9):280-286.
- [5] 赵宝平. 空气流量传感器工作原理及其检测[J]. 汽车维修,2018(9):45-48.
- [6] 邱伟,周斌,张浩,等. 进气节流对柴油机低负荷性能影响的试验研究[J]. 车用发动机,2017(4):219-224.
- [7] 董田普,张付军,刘波澜,等. EGR 对涡轮增压柴油机瞬态特性的影响[J]. 内燃机学报,2017,35(2):315-321.
- [8] 蒋玉魁,王金刚. 进气流量对车用柴油机动力性及排放性能的影响[J]. 小型内燃机与车辆技术,2018,47(2):99-103.
- [9] 王银燕,马传杰,杨传雷,等. EGR 率对高压共轨柴油机燃烧性能影响的多维仿真[J]. 热科学与技术,2017,16(3):218-223.
- [10] 卢小锐,高文志,高博,等. 内部 EGR 对柴油机燃烧排放性能影响的研究[J]. 汽车工程,2014,36(9):1029-1033.
- [11] 贾和坤,刘胜吉,尹必峰,等. EGR 对轻型柴油机缸内燃烧及排放性能影响的可视化[J]. 农业工程学报,2012,28(5):44-49.

Optimization of control strategy of intake flow for CHINA VI diesel engine

GUO Dongxue, PAN Wei, ZHUANG Mingchao, LI Jingjing, Zhang Chengwei

Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: In order to solve the misjudgment caused by the measurement deviation of the mass air flow (MAF) sensor of the CHINA VI diesel vehicle, the MAF measurement principle and control logic are analyzed, and the bench test and the actual road spectrum analysis of the faulty vehicle are carried out. The regeneration condition of the particle trap is selected to verify the MAF sensor and the intake pressure sensor, and optimize the control logic of the MAF. The optimized MAF control logic is verified by actual operation. The results show that the measurement deviation of MAF is the reason of vehicle power shortage. After the optimization of MAF control logic, the misjudgment failure rate caused by MAF sensor measurement deviation is reduced from 31.9% to 3.3%. This control strategy can effectively solve the misjudgment failure rate caused by MAF sensor measurement deviation.

Keywords: CHINA VI diesel engine; EGR; MAF; BPS; control strategy

(责任编辑:郎伟锋)