

基于转矩安全的歧管泄漏研究和监控系统开发

付亚豪¹, 杨帅^{1,2*}, 刘海然³, 邹超⁴, 何栋明⁴

1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 南昌智能新能源汽车研究院, 江西 南昌 330000;
3. 上海电子信息职业技术学院, 上海 201411; 4. 菲亚特克莱斯勒动力科技研发(上海)有限公司, 上海 201821

摘要: 基于道路车辆功能安全国际标准, 综合分析影响发动机转矩的因素和充气原理, 建立发动机进气歧管泄漏监控系统的控制模型并对监控系统关键参数进行试验标定。结果表明: 在不改变原有系统硬件的基础上, 该控制模型能够准确地对歧管泄漏进行监控, 保障发动机转矩安全。该监控系统可为当前大规模产业化交通工具的行车安全保障提供参考。

关键词: 汽油机; 歧管泄漏; 转矩安全; 监控系统; 控制策略

中图分类号: TK413.4; TP277.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-6397(2021)06-0010-07

引用格式: 付亚豪, 杨帅, 刘海然, 等. 基于转矩安全的歧管泄漏研究和监控系统开发[J]. 内燃机与动力装置, 2021, 38(6): 10-16.

FU Yahao, YANG Shuai, LIU Hairan, et al. Intake manifold leakage research and monitoring system development based on torque security[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2021, 38(6): 10-16.

0 引言

随着汽车工业的不断发展, 高效节能的新型汽油发动机已经得到广泛应用, 但突发性的车辆异常加速问题时有发生, 车辆的转矩安全越来越受到重视。文献[1]于2011年发布并于2018年更新^[2], 成为世界范围内汽车产业遵守的产品安全标准。

汽油发动机的歧管泄漏是影响车用动力转矩安全的核心因素之一。车用发动机有一部分工况处于歧管真空度大于0的情况, 即使采用可变气门升程的配气机构, 怠速和低负荷时也需要通过节气门限流实现稳定的转矩输出, 如果该工况下节气门截流失效导致转矩输出时进气量过多, 可造成车辆异常加速或者混合动力电池过载, 影响行车安全, 因此输出转矩安全性受到当前各大汽车厂家重点关注。虽然文献[1]发布时间较早, 但目前国内关于输出转矩安全的研究较少。因此, 为保障人员和车辆安全, 监控车用动力系统的输出转矩, 基于理论模型、文献[2]和工程实践, 结合发动机进气和燃烧的控制策略, 建立具有实际应用价值的工程控制模型对行车转矩安全具有重大意义。

本文中分析影响发动机转矩的因素, 根据节气门控制原理, 分析发动机主、次充模型原理, 设计节气门开度控制策略, 针对碳罐低压脱附管路脱落故障开发泄漏监控系统, 准确、稳定地监控歧管泄漏, 保障行车安全。

收稿日期: 2021-09-25

基金项目: 上海市技术性贸易措施应对专项项目; 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(22120190276); 南昌智能新能源汽车研究院前瞻技术资助项目(TPD-TC202110-06); 同济大学教学改革资助项目; 同济大学精品实验资助项目; 同济大学研究生综合教改项目; 同济大学实验教改资助项目

第一作者简介: 付亚豪(1991—), 男, 甘肃民乐人, 硕士研究生, 主要研究方向为车用动力系统及其复合控制, E-mail: fuyahao@foxmail.com。

*** 通信作者简介:** 杨帅(1981—), 男, 上海人, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为内燃机仿真和控制, E-mail: mermaid04@126.com。

1 功能安全分析

文献[2]从人员安全与工程应用的角度出发,通过危害分析与风险评估对车辆功能安全提出了开发标准和流程,涵盖汽车产品的整个生命周期,最大限度降低事故发生的可能性,得到国际社会广泛的认可,成为各大汽车公司设计安全监控系统的准则。

根据文献[2],分析输出转矩的控制流程,确定发动机歧管泄漏对实际输出转矩的影响。影响发动机输出转矩的因素如图1所示。

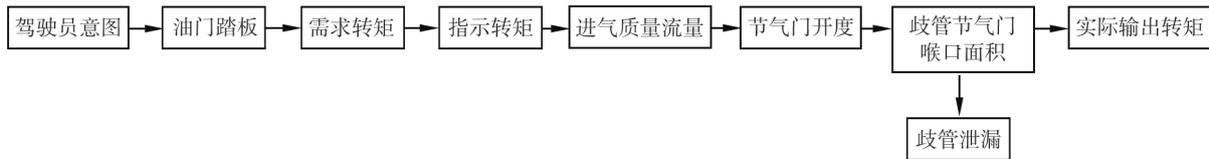


图1 影响发动机输出转矩的因素

根据歧管泄露导致的动力装置失效模式和文献[2]中的功能安全设计流程,分别对3种失效模式做出相应的功能安全定义,如表1所示。

表1 文献[2]中的功能安全设计分析

失效模式	危害事件	严重度 S	场暴露度 E	控制能力 C	汽车安全完整性等级	安全目标
输出转矩增加	追尾前车	2	3	3	8	节气门处于跛行位置,通过点火角控制发动机输出动力
发动机排温增加	损坏催化器	0	3	1	4	监控模型排气温度,超温加浓,直至断油
混合动力电池过载	损坏电池	0	4	1	5	混动系统进增程电量保持工作

注:表中数值越大表示安全等级越高。

2 发动机进气控制

2.1 发动机循环公式

当前市场上主流的汽油发动机采用奥拓循环,以工质燃烧推动活塞做功的方式把燃料的化学能转换为发动机的机械能。在现代汽油发动机实际控制中,喷油和点火响应迅速、精确,而充气响应较慢且需要间接测量,因此必须优先控气,然后以当前循环估算的实际进气量适配当量的燃油,通过控制点火角的方式在气路指示转矩的基础上产生最终的指示转矩。

计算发动机的指示转矩时,可以根据曲柄活塞连杆机构的工作原理,将燃烧产生的内能转化为做功冲程气体对活塞的做功,计算公式^[3]为:

$$W_i = p_i V_s = p_i (\pi D^2 / 4) s_p \times 10^{-6}, \quad (1)$$

式中: W_i 为平均指示压力在一个冲程内做的功,kJ; p_i 为平均指示压力,MPa; V_s 为气缸工作容积, mm^3 ; D 为活塞直径,mm; s_p 为活塞行程,mm。

发动机指示功率的计算式为:

$$P_i = W_i n / 30, \quad (2)$$

式中: P_i 为发动机指示功率,kW; n 为发动机转速,r/min。

发动机指示转矩的计算式为:

$$T_i = 9550 P_i / n, \quad (3)$$

式中: T_i 为发动机指示转矩, $N \cdot m$ 。

根据燃烧学定律, 单次循环燃烧冲程气体对单次循环的做功又可以表示为:

$$W_i = H_U m_{\text{fuel}} \eta_i, \quad (4)$$

式中: H_U 为燃料热值, kJ/kg ; η_i 为循环效率; m_{fuel} 为单缸每次循环喷油质量, kg 。

为了实现最优油耗和最低排放, 现代汽油发动机通过使过量空气系数接近 1 实现燃料充分燃烧和适配催化器最佳转化效率, 所以单次循环的当量空燃比

$$K_{\text{stoi}} = m_{\text{air}} / m_{\text{fuel}}, \quad (5)$$

式中 m_{air} 为单缸每次循环进气质量, kg 。

综上, 以当前循环为参考基准, 平均气路指示转矩可以转化为进气质量, 当前循环发动机指示转矩

$$T_{i/\text{cyl}} = K m_{i/\text{cyl}} \eta_i, \quad (6)$$

式中: $m_{i/\text{cyl}}$ 为当前循环发动机进气质量, kg ; K 为无量纲因素。

实际发动机控制中, 通过扫点插值的方法在不同的发动机工况 (负载和转速) 下直接得到当前循环系数, 可将式(6)转化为:

$$m_{i/\text{cyl}} = f(n, p_{\text{int}}) \cdot T_{\text{IMT}/\text{cyl}}, \quad (7)$$

式中: $T_{\text{IMT}/\text{cyl}}$ 为当前循环平均指示转矩, $N \cdot m$; p_{int} 为进气歧管压力, kPa ; $f(n, p_{\text{int}})$ 为循环系数, $mg/(N \cdot m)$ 。

在测功机台架上进行转矩测试, 可以计算得到发动机不同工况下的循环系数, 如图 2 所示。

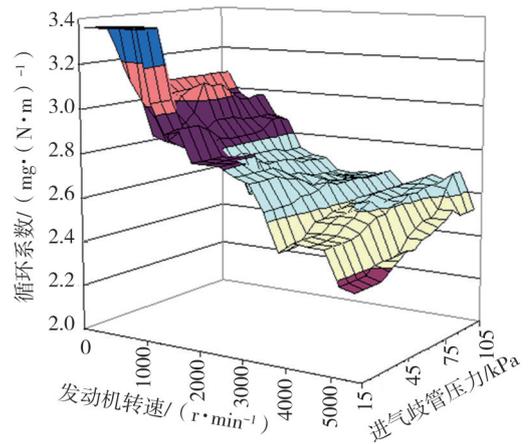


图 2 发动机循环系数 map 图

2.2 节气门节流原理和主、次充模型

2.2.1 节流原理

单次循环的进气量直接决定了发动机循环功, 当汽车低负荷运行时, 控制进气质量流量就可以控制发动机转矩输出, 所以需要控制节气门部分打开进行进气节流。节气门开启 50% 时空气流速分布如图 3 所示^[4]。由图 3 可知: 节气门可以有效控制进气流速, 从而控制进气质量流量。

可将通过节气门的气流看作是同缩放喷管相似的一种流动形式^[5], 将节气门节流模型进行简化, 如图 4 所示。

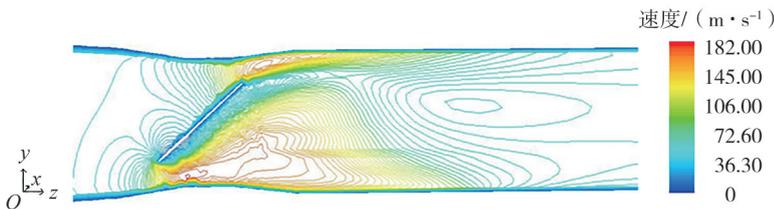


图 3 节气门开启 50% 时的空气流速分布

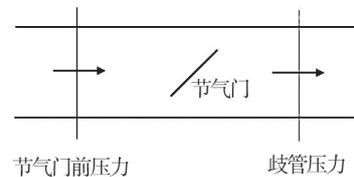


图 4 节气门节流简化模型

2.2.2 次充模型

利用流体力学进行推理, 压比流量系数

$$\varphi\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left(\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right)}, & \frac{p_2}{p_1} > \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left(\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{2}{\gamma-1}} - \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right)}, & \text{其他} \end{cases}, \quad (8)$$

式中: p_1 为节气门前进气压力, kPa ; p_2 为进气歧管的压力, kPa ; γ 为绝热因数。

根据速度密度方程可得当前循环的进气质量流量^[6]

$$\dot{m}_{V_{cyl}} = \frac{p_1}{\sqrt{RT_1}} \cdot S_{thr} \cdot \varphi\left(\frac{p_2}{p_1}\right), \quad (9)$$

式中: S_{thr} 为电子节气门的有效流通面积, mm^2 ; T_1 为节气门前进气温度, K ; R 为气体常数。

消除复杂因子的影响,式(9)可进行简化为:

$$\dot{m}_{V_{cyl}} = S_{thr} \cdot \frac{p_1}{\sqrt{T_1}} \cdot f\left(\frac{p_2}{p_1}\right), \quad (10)$$

式中: $f\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$ 为压比修正系数, $\frac{g\sqrt{K}}{s \cdot kPa \cdot mm^2}$ 。 $f\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$ 可由标定试验方法确定, 压比修正系数插值曲线如图 5 所示。

节气门开度和节气门喉口面积存在着物理关系^[7]

$$S_{thr} = \frac{\pi d^2}{4} \left(1 - \frac{\cos\alpha}{\cos\alpha_{CIB}}\right), \quad (11)$$

式中: d 为节气门阀片直径, mm ; α_{CIB} 为节气门最小开度; α 为当前节气门开度。

用插值曲线代替难以确定的复杂因子并且通过试验进行参数辨识,式(11)可简化为当前节气门开度的函数:

$$S_{thr} = f(\alpha). \quad (12)$$

函数关系可以通过数值代入的方法计算得到,节气门开度和节气门喉口面积转换曲线如图 6 所示。对发动机进行节流控制时,可以将节气门前馈控制策略简化,节气门前馈控制策略如图 7 所示。

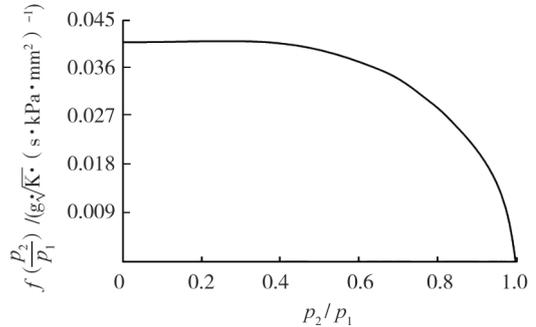


图5 压比修正系数插值曲线

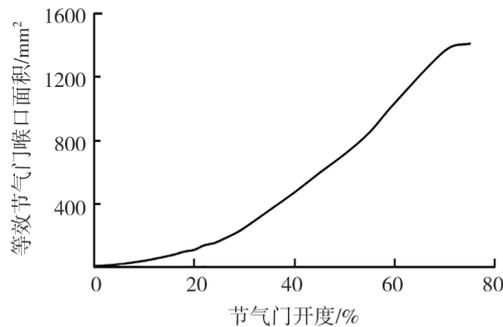


图6 节气门开度和节气门喉口面积转换曲线

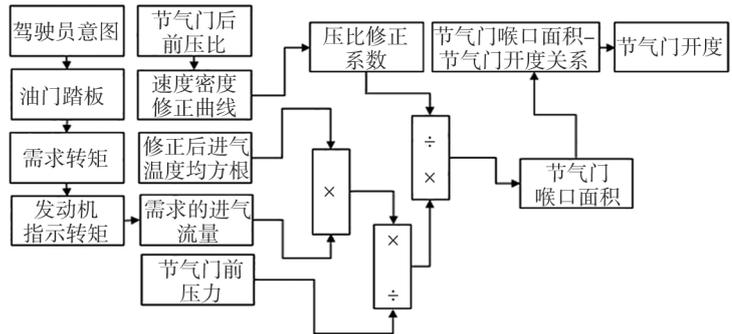


图7 节气门开度控制策略

综上所述,可以通过次充模型控制节气门的位置,即给定需求的进气质量流量,通过控制节气门进行限流。当进气歧管泄漏时,节气门限流失效,导致实际的进气流量超过需求,所以监控泄漏的关键在于如何精确计算出实际的进气质量流量。

2.3 主充模型

在发动机工作中,存在进气迟滞现象,需求的进气量不一定能够及时响应,因此采用理想气体的状态方程计算实际进气流量,适配当量的燃油来保证油耗和排放满足要求。

标准状态下的单缸每循环最大进气量^[8]

$$m_{0/cyl} = p_0 V_0 / RT_0, \quad (13)$$

式中: p_0 为标准状态下进气压力, kPa ; V_0 为单缸最大容积, mm^3 ; T_0 为标准状态下气体热力学温度, K 。

某工况下的单缸循环进气量(即主充模型)

$$m_{1/cyl} = p_s V_0 / RT_s, \quad (14)$$

式中: p_s 为实际状态下进气压力, kPa ; T_s 为实际状态下气体热力学温度, K 。

根据式(13)(14)可知:主充模型计算得到的进气质量流量和节气门开度无关,节气门后泄漏的气体质量流量可等效为节气门多开导致的增加的实测质量流量;实测的进气质量流量大于需求的进气质量流量,导致发动机实际输出转矩大于需求转矩,带来转矩失控风险,因此根据文献[2]的要求应设计影响发动机转矩安全的歧管泄漏监控系统。

3 转矩安全监控系统设计和标定

3.1 故障现象

根据当前发动机结构和实际用户使用情况统计,导致发动机歧管泄漏的关联件故障主要有4种:碳罐低压脱附管路脱落、机油盖打开、曲轴箱通风管路脱落、机油尺脱落。本文中仅进行碳罐低压脱附管路脱落标定试验,其余故障的监控可利用相同的原理进行类推。

由于发动机需要把碳罐积累的油气引入到歧管进行燃烧,如果管道发生脱落,就会导致大气通过脱附管路直接进入歧管,进气量增加。怠速工况(发动机转速为750 r/min)下,正常情况和碳罐脱附管路脱落故障时,需求和实际的进气质量流量关系曲线分别如图8、9所示。

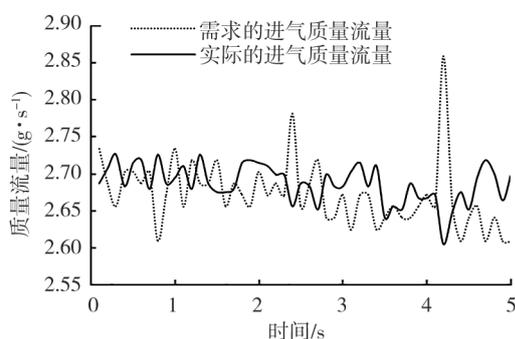


图8 正常的进气质量流量关系曲线

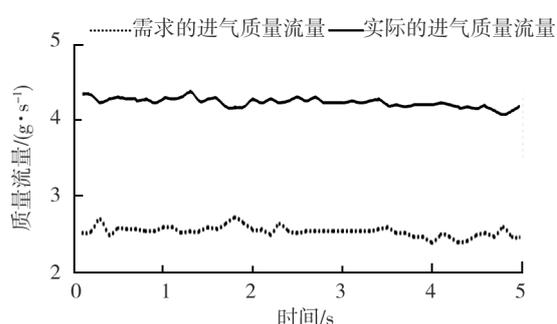


图9 管路脱落时进气质量流量关系曲线

由图8、9可知:正常情况下实际和需求的进气质量流量非常接近,故障情况下实际的进气质量流量明显大于需求,而且故障情况下进气质量流量趋于平缓,这是因为泄漏量较大,比例积分微分(proportional integral differential, PID)控制无法通过反馈调节对气路进行精确控制。

3.2 监控策略设计

根据节气门控制原理,可以由当前需求转矩确定节气门开度^[9-10],通过电动机将节气门直接打开至需求开度。

如果节气门后发生泄漏,导致歧管压力增大、充气效率增加,即实际的进气质量流量大于需求的进气质量流量。不同工况下、不同泄漏量导致实际与需求的进气质量流量偏差不同,如果泄漏量达到一定程度,大气就会把气流通过泄漏点压入进气歧管,导致2个进气质量流量的偏差过大^[11-13]。

根据发动机现有的传感器布置和已经存在的模型,设计进气歧管泄漏诊断策略,如图10所示。以10 Hz为采样频率进行误差采集并且积分,以5 s为周期进行一次故障判断。

监控发动机歧管泄漏时,应根据实测和需求的进气质量流量计算瞬态误差,在每5 s的监控周期内,对进气质量流量的误差进行累积。对图8、9中的质量流量误差计算,得到怠速工况(发动机转速为750 r/min)下正常和管路脱落时需求和实际进气质量流量的瞬态误差和累积误差,如图11、12所示。

由图11、12可知:进气歧管泄漏时累积误差和正常情况存在明显差别。当管路脱落后,二者的累积误差平缓稳定上涨,趋于线性,这是由于进气歧管泄漏导致气路PID控制失效、进气质量流量趋于稳定,这种稳定误差累积有利于故障诊断。

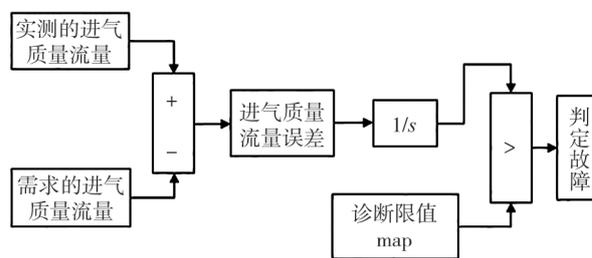


图10 进气歧管泄漏诊断策略

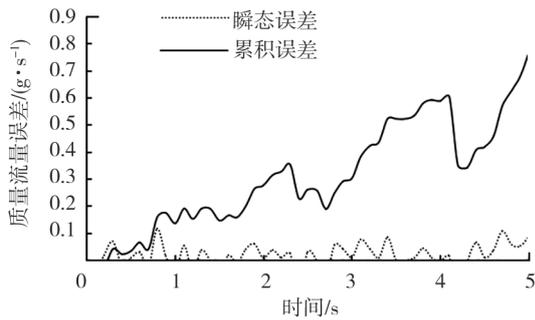


图 11 正常时需求和实际的进气质量流量误差

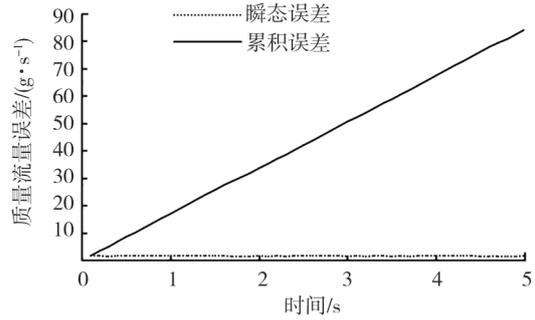


图 12 管路脱落时需求和实际的进气质量流量误差

3.3 诊断结果统计和限值标定

控制发动机在怠速下进行多次试验并计算,得到不同工况下正常和碳罐脱附管路脱落时的进气质量流量积累试验结果,如表 2 所示。

表 2 不同工况下正常和管路脱落时的进气质量流量 10 次试验累积结果

工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	均值	均方差
正常	0.21	0.81	0.19	0.53	0.33	0.70	0.87	0.25	0.65	0.19	0.473	0.269
故障	82.78	80.26	90.64	78.51	83.90	90.60	78.85	82.02	82.60	81.55	82.784	4.280

正态随机变量 x 的概率密度函数

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (15)$$

式中: u 为均值, σ 为均方差。

根据经验和数据分析,累积的进气质量流量误差服从正态随机分布。可设积累的进气质量流量为随机变量 x 、均值为 u 、均方差为 σ ,进行正态分布数据处理,以保障转矩安全为标定原则,诊断限值应当保证故障能够被准确识别,故诊断限值设置为 20 g/s,诊断结果分布如图 13 所示。

由图 13 可知:诊断限值能明显区分 2 组数据,对诊断结果具有非常好的辨识度。根据充气模型解耦和文献[2]要求,设计的安全监控系统具有非常好的收敛特征,可以准确、稳定地监控歧管泄漏。

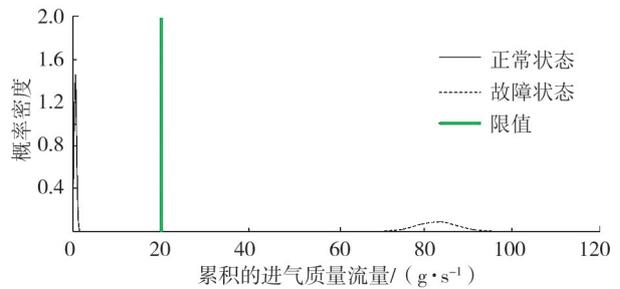


图 13 诊断结果分布图

4 结论

1) 基于文献[2]分析发动机节气门后泄漏带来的风险,引入监控系统的开发思路和构想;对节气门泄漏进行安全评估和设计,定义安全等级和安全风险。

2) 研究了节流装置的工作原理和数学模型,并且根据电控发动机目前具有的成熟模型设计了发动机歧管泄漏监控策略。

3) 通过标定试验在怠速工况下调校了碳罐脱附管路脱落导致的发动机歧管泄漏安全监控关键参数,设置诊断限值,准确、稳定地监控歧管泄漏,保障发动机转矩安全。

由于标定需要采集大量试验数据,因此基于智能算法的监控系统将成为本课题的下一个研究方向。

参考文献:

- [1] International Organization for Standardization. Road vehicles; functional safety—part1: vocabulary; ISO 26262—1; 2011 [S]. Geneva, Switzerland; ISO, 2011.
- [2] International Organization for Standardization. Road vehicles; functional safety—part1: vocabulary; ISO 26262—1; 2018 [S]. Geneva, Switzerland; ISO, 2018.
- [3] 王建昕, 帅石金. 汽车发动机机原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [4] 杨帅, 魏亚男, 薛良君, 等. 节气门急速开启过程流动噪声数值分析与研究[J]. 振动. 测试与诊断, 2017, 37(3): 596-601.
- [5] PURSIFULL R, KOTWICKI A J, HONG S, et al. Throttle flow characterization [C]//SAE 2000 World Congress. Detroit, USA; SAE International, 2000.
- [6] ANDERSSON P, ERIKSSON L. Air-to-cylinder observer on a turbocharged SI-engine with waste gate [C]//SAE 2001 World Congress. Detroit, USA; SAE International, 2001.
- [7] 王都, 王俊席, 任鹏飞, 等. 节气门流量模型对天然气发动机控制精度的影响[J]. 内燃机与动力装置, 2013, 30(4): 1-3.
- [8] 徐朝闯, 彭美春, 林怡青, 等. 电控摩托车发动机主充模型的研究[J]. 车用发动机, 2010(1): 15-19.
- [9] 李楠, 朱晨虹, 黄英铭, 等. 汽油机进气歧管均匀性影响因素分析及结构参数优选[J]. 车用发动机, 2021(1): 28-33.
- [10] 王魏, 陈杰, 刘少飞, 等. 基于模型的电子节气门控制系统开发[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2015, 44(5): 57-62.
- [11] 陈虹, 郭露露, 宫洵, 等. 智能时代的汽车控制[J]. 自动化学报, 2020, 46(7): 1313-1332.
- [12] 高金武, 孙铂奇, 高炳钊, 等. 基于自适应观测器的发动机进气流量估计[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(6): 1958-1966.

Intake manifold leakage research and monitoring system development based on torque security

FU Yahao¹, YANG Shuai^{1,2*}, LIU Hairan³, ZOU Chao⁴, HE Dongming⁴

1. Automobile College, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Nanchang Automotive Institute of Intelligence & New Energy, Nanchang 330000, China;

3. Shanghai Technical Institute of Electronics Information, Shanghai 201411, China;

4. FCA Powertrain Technology (Shanghai) R&D Co., Ltd., Shanghai 201807, China

Abstract: Based on the international standards for functional safety of road vehicles, the factors affecting engine torque and the aircharging are comprehensively analysed, a control model of the engine intake manifold leakage monitoring system is established, and the key parameters of the monitoring system are tested and calibrated. The results show that: without changing the original system hardware, the control model can accurately monitor the leakage of the manifold and ensure the safety of the engine torque. The monitoring system can provide a reference for the safety of current large-scale industrialized vehicles.

Keywords: gasoline engine; manifold leakage; torque security; monitoring system; control strategy

(责任编辑: 刘丽君)