

Research on Performance Test of Exhaust Gas Recirculation Valve in Automobile Engine

Xin Yang Bin Wang

Wenzhou Yiqi Electromechanical Technology Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang, 325000, China

Abstract

To address the challenges of exhaust gas purification and operational condition matching in internal combustion engines, this study tackles issues such as performance testing inaccuracies and incomplete evaluation criteria for EGR valves. The paper first elucidates the working principles of EGR systems and valve functionalities, establishing a comprehensive performance evaluation framework that incorporates both dynamic and static metrics. Subsequently, it systematically examines practical strategies across five key dimensions: sealing integrity, dynamic response, anti-caking capability, full-range durability, and intelligent testing. Through concrete engineering case studies, the research analyzes operational implementation points and optimization pathways for each testing method. This study provides precise theoretical support and actionable technical solutions for EGR valve performance optimization, batch testing, and engineering applications, ultimately enhancing emission control efficiency and operational stability in internal combustion engines.

Keywords

exhaust gas recirculation valve; performance testing; parameter system; engineering practice; multidimensional detection

汽车发动机废气再循环阀性能测试研究

杨鑫 王斌

温州日益机电科技有限公司, 中国·浙江温州 325000

摘要

为满足内燃机尾气净化和工作状况匹配的需要, 针对EGR阀性能测试精准度偏差、测试项目不全面等问题, 本文先说明EGR系统的工作原理和阀的功能, 建立包含动态和静态指标的关键性能评价参数体系, 接着依次探讨密封性、动态反应、抗积碳、全工作状况耐久性及智能测试五个方面的实践策略, 结合具体工程实例分析各测试方法的实际操作要点和优化途径。该研究为EGR阀性能优化、批量检测以及工程应用提供了精确的理论支持和可行的技术方案, 有助于提高内燃机排放控制水平和运行稳定性。

关键词

废气再循环阀; 性能测试; 参数体系; 工程实践; 多维度检测

1 引言

随着内燃机排放法规越来越严格, EGR 阀的性能稳定对于尾气净化和动力平衡非常关键。现有的测试方法存在一定限制, 基于此, 本文构建理论体系并提出多方面的工程测试策略, 为 EGR 阀总成性能测试提供技术支持。

2 废气再循环阀性能测试的理论基础

2.1 废气再循环 (EGR) 系统工作原理与阀体功能

EGR 系统作为内燃机尾气净化以及热效率调整的关键部位, 其运行原理和流体混合动力学、燃烧学理论相契合。

【作者简介】杨鑫 (1986-), 男, 中国河北唐山人, 本科, 高级工程师, 从事汽车发动机零部件设计开发、废气循环阀、增压器等进、排气零部件设计开发研究。

该系统把排气歧管里经过降温处理的一部分废气引回到进气歧管, 借助进气气流的剪切作用和湍流扩散效果, 让废气和新鲜混合气能够均匀混合。从燃烧学的角度来讲, 废气会降低氧含量并且吸收燃烧产生的热量, 根据氮氧化物生成动力学理论, 将燃烧室的峰值温度控制在 1500K 以内, 从而抑制 NOx 的热生成; 同时, 依据爆震热力学原理, 对混合气的自燃特性进行优化, 在不同工况下平衡排放和动力方面的需求。

2.2 EGR 阀性能核心评价参数体系

EGR 阀性能评价参数体系以流体力学和自动控制理论为基础, 构成了多维度的架构。静态指标依靠流体密封理论和精密机械控制原理: 开度精度以伺服控制精度理论为依据, 保证阀芯的位移和 ECU 指令呈线性对应关系, $\pm 3\%$ 的偏差限值来自空燃比控制的稳态误差允许范围; 密封性能依照泊肃叶定律和伯努利方程, 对全关时的泄漏量进行控

制,防止混合气浓度出现异常而影响燃烧的稳定性。背压性能 ($\geq 3\text{bar}$),满足高低压阀在不同工况下的动力需求。动态指标结合了瞬态流体力学和时域响应分析, $\leq 100\text{ms}$ 的响应滞后时间能够适应发动机的瞬态工况,流量调节线性度 (偏差 $< 8\%$) 则可以保证控制算法的适配性,与流体流量和开度的耦合关系理论相符合详见表 1。

表 1 废气再循环阀性能测试的理论浏览表

参数类型	具体指标	核心要求
静态指标	开度精度	偏差 $\leq \pm 3\%$
	密封性能	全关泄漏量达标
	背压性能	$\geq 3\text{bar}$
动态指标	响应滞后时间	$\leq 100\text{ms}$
	流量调节线性度	偏差 $< 8\%$

3 面向工程应用的性能测试实践策略

依据前面所说的理论支持,按照工程实际需要,下面从多个方面构建测试实施体系,把重点放在关键测试情况和具体实施办法上,给 EGR 阀性能验证提供能够实际运用的工程计划。综合性能是基本的保障条件,需要运用高精度的量化方式来打破单一的检测限制,首先性测试建立精确的检测步骤及测试项目。

3.1 综合性能测试包含 PWM 开环驱动和闭环驱动两个模块进行运行状态测试及动态响应优化, PWM 波形激励与阶跃响应综合测试

运行状态检测 EGR 阀关闭到打开、打开到关闭,运行顺畅度,通过采集连续步进之间信号变化量监控过程测试其运行平稳性、是否存在卡滞和各个机械止点位置信号、位移等,监控其基本的运行性能。EGR 阀的动态反应特征会直接作用于发动机在瞬间工作状态时的适应能力,其反应速度、超出预期的变化量、稳定状态下的偏差需要和 ECU 的控制方法精确契合。以 PWM 波形作为主要驱动方式、通过调整脉冲频率和占空比模仿 ECU 实际发出的控制信号,有针对性地测试阀门在不同激励信号作用下的运动反应情况,以及通过施加突然变化的控制信号迅速捕捉阀门从起始位置移动到目标开启程度的运动过程并量化反应延迟时长、上升时长等重要指标的阶跃响应测试。综合测试同时搭建闭环测试模块,实时收集 PWM 控制信号和阀门位移的数据,通过对数据进行同步分析来排除信号异常、机械部件卡顿等干扰因素,同时结合流体力学的仿真结果,对激励信号的参数和阀体的机械构造进行优化,实现动态反应性能的逐步提升,以保证在急加速、急减速等瞬间工作状态时,废气再循环的量能够迅速按照指令进行调整。

在某个乘用车发动机研发项目里针对与 1.5T 涡轮增压发动机配套的 EGR 阀开展动态反应优化测试,目标为将阶跃响应的延迟时间控制在 80 毫秒以内且超调量不超过 5%,测试系统使用 NI CompactRIO 控制器生成频率范围在 100-

500 赫兹、占空比调节范围为 0-100% 的 PWM 激励信号,并通过采样频率为 10 千赫的激光位移传感器收集阀门位移数据。^[2]首先采用频率为 500 赫兹、占空比从 20% 跃变到 80% 的激励信号来测试初始的反应性能,发现延迟时间为 110 毫秒,超调量达到了 8%,而且存在阀门运动卡顿的现象。通过对数据曲线进行分析,判断卡顿是由于阀门导向机构的摩擦阻力过大或 PWM 信号频率较低导致控制精度不够。优化方案是将 PWM 信号频率提高到 1000 赫兹,提升导向套表面粗糙度或改进导向套材质 (比如石墨轴套)、优化配合间隙,然后再次进行综合测试。

密封性测试达到标准是 EGR 阀稳定运行的基础,然而传统的静态检测方式很难满足像国六这样严格的排放标准下对于实际泄漏的检测要求。^[1]所以,使用测试系统模型,结合工程实际测量的情况对检测方法、参数进行优化,实现对泄漏量的测量准确,为密封性能的评价提供可信的数据。

3.2 密封性和背压力测试,搭建定制的测试系统模型

密封程度是 EGR 阀保证工作状态稳定的关键因素,阀门关闭位置漏气量超过标准会造成额外的废气进入进气系统,打破混合气体浓度的平衡,加重燃烧的不稳定并引发排放超标。过去的水压检测泄漏、气压差检测泄漏的办法,因检测装置和检测参数差异导致检测数据的失准。检测时要先搭建被测控体部位封闭的检测空间,并施加规定的测试压力,同时基于产品特性辅助反向通电锁紧阀门,模拟检测车载工况下产品的实际泄漏量。背压测试是模拟负载工况、检测产品推力的有效途径,检测时在阀门端施加一定压力的压缩气体,检测系统施加 100% 占空比驱动阀门,压力传感器检测压力变化情况,系统采集位置信号变化,通过曲线判定实际背压值。

一家商用车发动机工厂针对国六排放标准的 EGR 阀进行密封检测,选择型号为 EGR-630、采用双密封面结构且设定泄漏临界值 $\leq 30\text{L/min}$ 的电控提升阀作为检测对象,检测前先对腔体部位进行封堵、将其固定,进气端在保持 0.1 MPa 稳定气压下。充气时间为 4 秒,保压 5 秒,检测 4 秒后读取泄漏仪的数据。检测时发现阀门泄漏为 43L/min,增加反向通电后,实际泄漏为 27L/min。反向通电更符合产品使用工况,避免盲目调整导致制造过剩。切换检测工位,运用背压检测系统完成背压检测。背压检测能够实时监控产品推力制造过程一致性。

3.3 抗积碳测试,加速老化台架与碳沉积量化分析

汽车发动机排出的气体里,没烧完的燃料、润滑油里的脏东西等,会在 EGR 阀的阀杆、密封的地方和气体流过的通道留下碳堆积物。时间长了,这些堆积物会让阀杆卡住、打开的精准度降低、密封效果变差,大大影响阀门的使用时间。抗积碳测试的关键,是用加速老化的设备模拟实际使用时的环境,让碳堆积形成的时间变短,同时建立科学的计算碳堆积多少的分析办法,准确评估阀门抗积碳的能力。加速

老化的设备要模拟发动机不同工作状态下排气的温度、流动速度、成分和压力等数据,通过延长高负荷工作的时间、增加排气中碳颗粒的浓度等方法,加快碳堆积的产生。

一家发动机零件公司选用型号为 EGR-850 的电控阀对重型柴油机的 EGR 阀进行抗积碳性能测试,搭建专门模拟柴油机在额定负荷、怠速、加速等典型工作状态,且排气温度控制在 200-550℃、排气流动速度在 5-20m/s 之间,并通过添加柴油添加剂将排气中碳颗粒浓度提高到实际工作状态下 3 倍、老化时间设定为 1000 小时的加速老化设备。在老化测试前,先测试阀门打开的精准度、密封性能和动态反应指标,把这些作为基础数据。^[1]老化测试结束后,拆开阀门发现阀芯表面和阀座边缘有均匀的碳堆积层,用电子天平称得碳堆积的重量为 1.2 克,通过三维激光扫描发现碳堆积使阀门有效流通面积减少了 8%。

3.4 全工况耐久, 高低温交变振动复合测试方案

EGR 阀的工作环境比较复杂,要经受温度高低交替变化、震动冲击、有腐蚀性气体的侵蚀,全工况持久测试的目的是模仿实际工作过程中的各种极端状况,检验阀体长时间运行的可靠程度和稳定情况。测试运用温度高低交替变化和震动一起加载的方式,避开单一环境测试的不足,让测试更接近实际工作状况。温度高低交替变化测试借助环境试验箱实现从 -40℃到 150℃的温度循环,通过控制升温、降温速度和恒温时间模拟冬季低温启动、夏季高温运行、工作状况转换时的温度改变;震动测试通过电磁振动台施加频率范围 5-2000Hz、加速度 0.5-40g 的正弦和随机震动负荷,模拟发动机运行和车辆行驶过程中的震动冲击。

3.5 智能测试, 多传感器数据融合的实时诊断系统

以往 EGR 阀检测大多用单个传感器收集数据,存在检测准确度不高、抗干扰能力欠佳、故障识别迟缓等状况,很难满足智能化生产和维护的需要。运用多传感器数据整合的

实时诊断系统,借助集成位移、压力、温度、振动等不同种类的传感器,同时收集阀体运行时的多方面数据,再结合数据预先处理、特征提炼与整合算法,能够对性能参数进行精确监测,并实现故障的早期诊断。

某汽车零部件企业自主研发的新型智能废气再循环阀搭建的测试系统,运用多传感器数据整合系统来完成批量生产中的实时诊断。该系统集成了激光位移传感器、压力传感器、温度传感器和振动传感器,分别收集门位移、腔体压力、阀体表面温度和振动信号,传感器的采样频率都设定为 10 千赫兹,通过工业以太网来实现数据的同步传输。在数据预先处理阶段,运用小波分析算法来去除噪声干扰;在特征提炼阶段,提取位移偏差、压力波动范围、温度变化程度和振动频率等关键特征量;运用加权平均整合算法对多源特征数据进行整合,从而构建性能评估模型。

4 结语

本文所构建的经具体实例验证具有实际操作可行性和可靠性的 EGR 阀性能检测理论框架及五项工程检测策略,在有效填补现有检测方法不足的同时为阀体性能优化和质量把控提供全面技术支持,后续工作中可结合智能化技术进一步提升检测准确度,以助力内燃机行业落实更严格的排放和能效标准。

参考文献

- [1] 陆玲亚,王吉华,薛芹余,等.热端废气再循环阀的设计及试验研究[C]//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.中国内燃机学会,2015.
- [2] 邓彪.废气再循环单向阀对燃气发动机性能的影响[J].柴油机设计与制造,2023,29(3):25-30.
- [3] 李鲲.发动机废气再循环阀流场特性与多场协同机理研究[D].湖南大学[2026-01-22].