

全可变液压气门系统气门运动规律动态测量与数据处理方法

魏枫展^{1,2}, 柯泽锋^{1,2}, 贾德民³, 赵淇东³, 常英杰^{1,2}, 谢宗法^{1,2*}

1. 山东大学机械工程学院, 山东 济南 250061;

2. 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061;

3. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261606

摘要:搭建气门升程测试平台,测量全可变液压气门系统(fully hydraulic variable valve system, FHVVS)的气门运动规律,分析发动机转速、传感器动态响应特性以及数据处理方法对气门升程测量精度的影响。结果表明:凸轮轴瞬时转速波动随驱动电机转速的降低而增大,通过角标信号对采集的气门升程进行数据处理,可以减少由于瞬时转速波动导致的气门升程测量误差;传感器动态响应特性不足造成气门升程相位迟滞;气门加速度波动频率与液压压力波动频率应一致,通过选取合适的滤波截止频率准确计算气门加速度;经五点三次平滑法处理后的气门升程更接近实际结果。

关键词:FHVVS;气门运动规律;数据处理

中图分类号:TK421.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2023)03-0001-07

引用格式:魏枫展,柯泽锋,贾德民,等.全可变液压气门系统气门运动规律动态测量与数据处理方法[J].内燃机与动力装置,2023,40(3):1-7.

WEI Fengzhan, KE Zefeng, JIA Demin, et al. Method of dynamic measurement and data processing of valve motion law for fully variable hydraulic valve system[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023,40(3):1-7.

0 引言

随着排放标准和油耗标准升级,节能减排成为传统内燃机发展的迫切需求^[1]。可变气门技术不仅可以改变气门升程、启闭时刻和开启持续期,还能根据发动机具体工况控制气门多次开启,进行多次开启与单次开启之间的转换^[2-4]。此外,可变气门技术在减小泵气损失、提高充气效率、改善怠速稳定性、实现废气再循环、米勒循环以及缸内制动等方面具有显著优势^[5-8]。因此,将可变气门技术应用于发动机,可以实现发动机节能减排、提升车辆行驶安全性。

全可变液压气门系统(fully hydraulic variable valve system, FHVVS)的气门运动规律动态测量是研究配气机构的必要环节,可以用来判断配气系统设计的优劣及进行进一步的设计改进与优化^[9]。通过搭建配气机构倒拖试验台架对配气机构动力学进行试验研究,利用电机直接倒拖配气机构进行试验测量,不需要进行整机试验就可获得配气机构气门运动规律,极大降低试验成本。

FHVVS的气门运动规律试验数据采集过程中存在许多高频干扰信号,去除高频干扰信号获得所需

收稿日期:2023-03-11

基金项目:国家重点研发计划项目(SQ2020YFF0416411);山东省重点研发计划项目(2019JZZY010914)

第一作者简介:魏枫展(1994—),男,山东日照人,工学硕士,助理实验师,主要研究方向为车用发动机动力匹配,E-mail:weifengzhan@sdu.edu.cn。

*通信作者简介:谢宗法(1963—),男,山东莒县人,工学博士,教授,主要研究方向为车用发动机工作过程、车用发动机动力性能匹配、车用发动机全可变液压气门机构,E-mail:zongfax@sdu.edu.cn。

要的有效信号是气门运动特性试验研究的重点之一。在配气机构数据动态测量中常用的数据处理方法包括滤波、拟合、光顺与多循环平均等。刘忠民等^[10]利用小波分解与重构的方法剔除了气门加速度积分结果漂移和位移微分结果高频干扰,更加真实地反映气门实际动态特性;李建锋等^[11]利用曲线拟合方法降低了实测加速度信号中的试验误差,并通过对多次循环数据平均后进行2次积分获得气门升程,与理论气门升程基本吻合。在配气机构数据处理中,多循环平均与光顺的数据处理方法一般与其它数据处理方法结合使用,虽然目前对配气机构数据处理方法较多,但仍然缺乏区分杂波干扰信号与气门信号的精确依据。

本文中针对一种自主研发的基于上置式凸轮轴驱动的 FHVVS,搭建 FHVVS 气门运动规律倒拖试验台架,利用倒拖台架对气门升程进行动态测量,分析发动机转速、传感器动态特性以及数据处理方式对气门升程测量精度的影响。

1 试验样机与装置

1.1 试验样机和 FHVVS 机构

试验样机选用某国产增压中冷、直列 6 缸柴油机,凸轮轴布置形式为单顶置式,发动机的主要技术参数如表 1 所示。

FHVVS 总体布置如图 1 所示。FHVVS 的进、排气凸轮集中在同一根凸轮轴上,进、排气凸轮各 6 个,分别驱动第 1~6 缸的进、排气门。该液压气门系统主要由机械传动系统、液压传动系统和控制系统组成,其中,机械传动系统主要由配气凸轮、摇臂、液压挺柱、液压活塞和气门组件等组成;液压传动系统主要由挺柱油腔、活塞油腔和控制阀油腔及其中间连接通道组成;控制系统主要调节控制阀的开通和关闭位置,以改变 FHVVS 的泄油相位(泄油时的曲轴转角)。控制阀控制泄油时刻的工作原理见文献[12]。

1.2 气门升程测试系统

由于在柴油机气缸内无法直接安装测量气门升程用激光位移传感器系统,因此搭建配气机构倒拖试验台架,模拟配气机构的实际运转状态并测量 FHVVS 的气门升程,倒拖试验台架示意图如图 2 所示。该倒拖试验台架主要由 3 部分组成:1)机械传动系统。包括驱动电机、齿轮箱、凸轮轴等,用于驱动 FHVVS 系统。2)液压泵站。主要作用是模拟柴油机润滑系统,为 FHVVS 提供油压为 0.1~1.0 MPa 的润滑油液(润滑油标号为 20W-50),并为凸轮等气门机构运动件提供润滑油。3)气门升程测量系统。主要由激光位移传感器、角标信号传感器、数据采集模块以及计算机等组成,用于采集试

表 1 试验样机主要参数

排量/L	额定转速/(r·min ⁻¹)	最大扭矩/(N·m)	每缸气门数
9.5	1 900	1 800	4

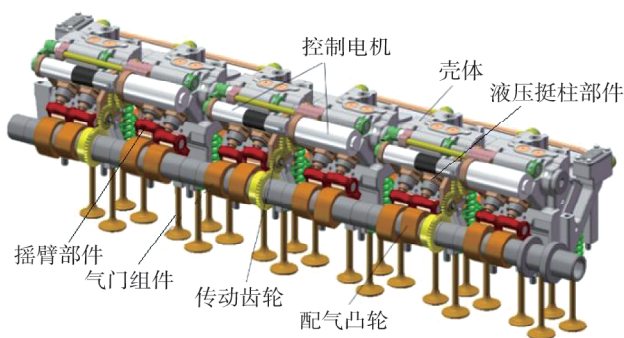


图 1 FHVVS 总体布置

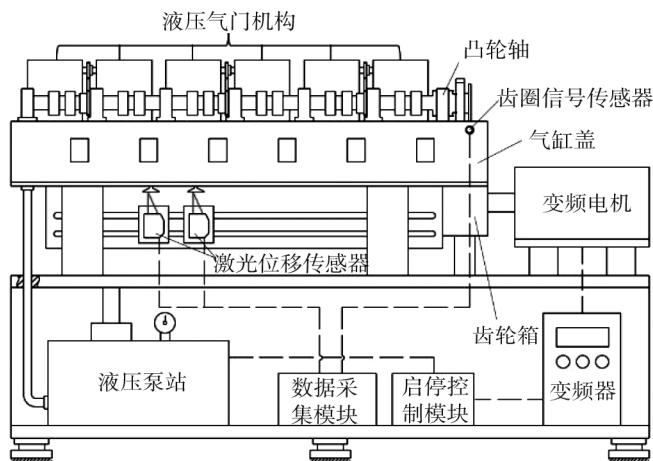


图 2 倒拖试验台示意图

验数据。试验用主要仪器设备及型号如表2所示。

表2 试验主要仪器设备及型号

设备名称	变频电机	变频器	激光位移传感器 ^①	齿圈信号传感器 ^②	高速采集卡
型号	YE2 160L-8	VFD25AMS43AFSAA	ILD2300-50	CZ400	MP426

①测量精度为0.8 μm;②测量范围为0~15 kHz。

2 结果与分析

根据气门瞬态运动规律可以研究发动机不同工况下的换气情况,利用激光位移传感器可直接测量气门升程。影响气门升程测量精度的因素主要包括:发动机转速、传感器动态特性以及气门升程数据处理方法等。通过分析气门升程测量精度的影响因素,可进一步了解全可变液压气门机构的动力学性能。

2.1 转速波动对气门升程测量的影响

试验过程中通过变频器调节驱动电机转速,利用数据采集模块实时采集气门升程,发动机转速为200、1 000 r/min时气门的原始升程如图3所示。

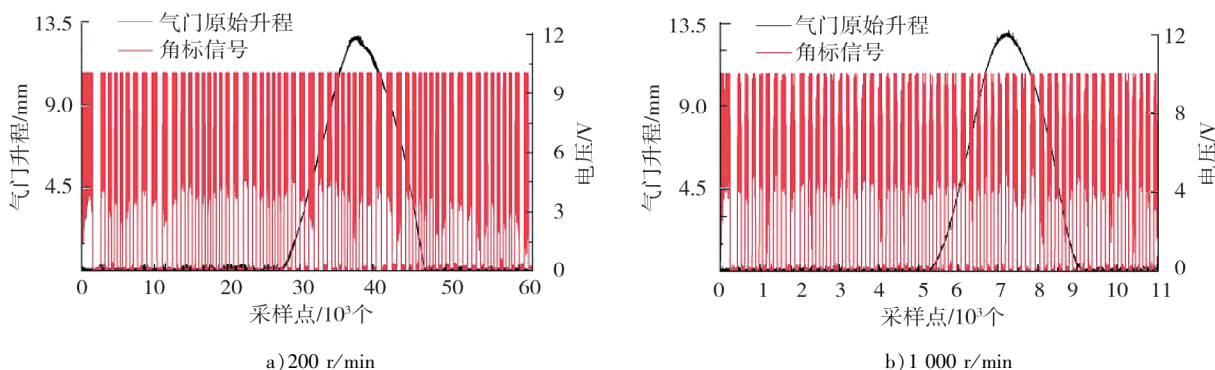


图3 不同发动机转速下实测气门的原始升程

由图3可知:相比发动机转速为1 000 r/min,转速为200 r/min时的气门升程曲线存在较大变形且相邻角标信号间距不均匀。因为驱动电机在带动凸轮轴实现气门开闭过程中需要克服气门弹簧等阻力,气门开启阶段,凸轮轴驱动挺柱克服气门组件的弹簧预紧力,导致转动速度变慢;当气门上升到一定高度,挺柱随凸轮开始回落,气门组件的弹簧力与驱动电机一起做功使气门回落,气门回落阶段驱动电机需要克服的阻力小,转动速度加快,驱动电机需要克服交变阻力,阻力矩波动造成瞬时转速波动,这种瞬时转速波动在低转速下更加明显。

为了提高气门升程测量结果的准确性,可以利用信号盘的齿数对转角角度进行分度。凸轮轴瞬时转速波动导致信息采集时相邻2个采样点之间转过的曲轴转角波动。由于信号盘上的齿数均匀分布,因此可以用信号盘齿数分度转角角度。信号盘的齿数越多,对曲轴角度分度越细,测量精度越高。信号盘结构示意图如图4所示,由于发动机空间限制以及角标信号传感器精度的原因,设计均匀分布60个齿的信号盘,在此基础上舍弃1个齿,将缺齿位置作为标记。利用角标传感器测量信号盘测得的部分角标信号如图5所示。信号盘上除了缺齿位置,每相邻2个齿之间的度数是固定的,相邻2个齿上升沿之间的凸轮转角间隔均为6°。同时,由于高速采集卡的采样频率是确定的,可以根据角标信号中相邻2个齿上升沿之间的采样点数计算出凸轮轴在凸轮转角每6°的瞬时转速波动。

瞬时转速波动率

$$\eta_n = \sigma_n / \bar{n}, \quad (1)$$

式中: σ_n 为凸轮轴瞬时转速标准差, $\bar{n}$ 为凸轮轴平均转速, n 为凸轮轴转速。

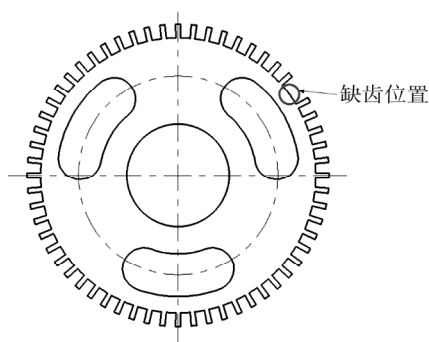


图4 信号盘结构示意图

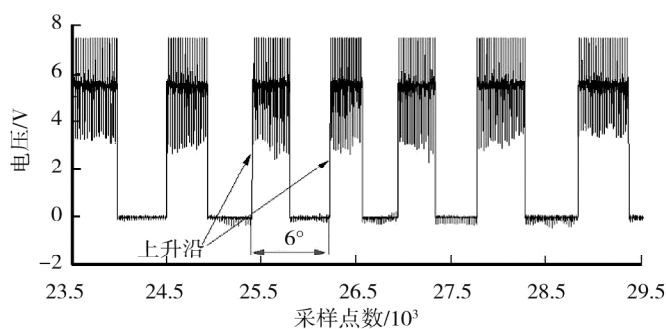


图5 信号盘部分角标信号示意图

发动机转速为 200、600、2 100 r/min 时凸轮轴瞬时转速如图 6 所示。

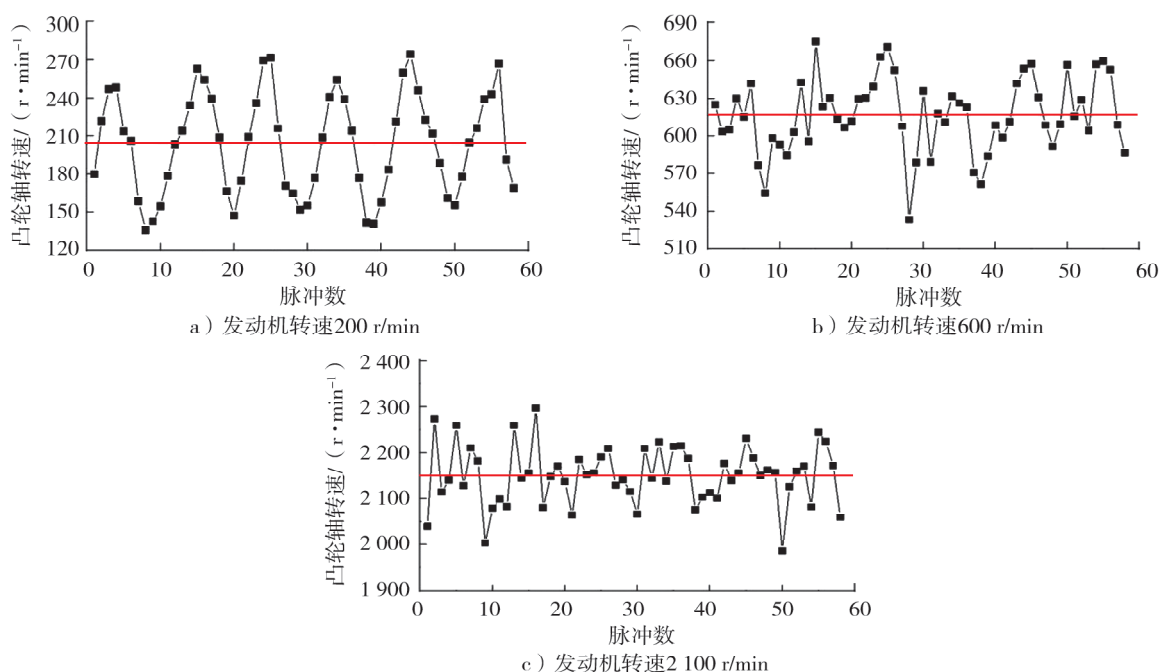


图6 不同发动机转速下凸轮轴瞬时转速

由图 6a) 及式 (1) 可知: 发动机转速为 200 r/min 时, 凸轮轴瞬时转速呈现周期性波动, $\bar{n} = 203.74 \text{ r/min}$, $\sigma_n = 40.03 \text{ r/min}$, $\eta_n = 0.196$ 。这是由于在 6 缸发动机中, 凸轮驱动各缸液压挺柱过程中均导致阻力矩波动, 因此在 1 次气门单循环中出现 6 个波峰与 6 个波谷。

由图 6b) c) 及式 (1) 可知: 发动机转速为 600 r/min 时, $\bar{n} = 616.41 \text{ r/min}$, $\sigma_n = 29.69 \text{ r/min}$, $\eta_n = 0.048$; 发动机转速为 2 100 r/min 时, $\bar{n} = 2 150.47 \text{ r/min}$, $\sigma_n = 64.40 \text{ r/min}$, $\eta_n = 0.030$ 。凸轮轴瞬时转速波动随着发动机转速的升高而降低。

为改善低转速下的瞬时波动, 对采集的气门升程数据进行处理: 1) 将角标信号中相邻 2 个缺齿信号的上升沿作为判断气门单次循环的依据; 2) 将相邻上升沿之间的数据均匀选取 120 个点进行插值处理; 3) 通过多循环平均的方法获得气门升程数据。发动机转速为 200 r/min 时, 经过角度转换后气门升程如图 7 所示。由图 7 可知: 利用信号盘采集的角标信号对气门升程数据进行处理, 可以有效

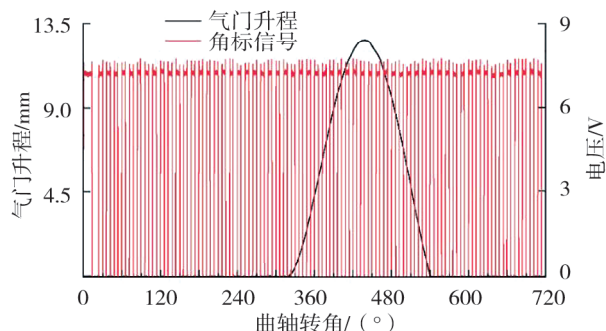


图7 发动机转速 200 r/min 下角度转换后气门升程

减少低转速工况下瞬时转速波动导致的气门升程的测量误差。

2.2 传感器动态特性对气门升程测量精度的影响

为了研究传感器动态特性对气门升程测量精度的影响,试验中采用激光位移传感器在不同的采样频率下,对不同转速下的 FHVVS 气门升程进行测量。传感器采样频率为 100 kHz 时不同发动机转速下的实测气门升程如图 8 所示,图中 M 点为缺齿位置标记点,相对应的曲轴转角为 -64° , N_1 、 N_2 、 N_3 分别为在发动机转速 200、1 000、2 100 r/min 时在上升段气门升程为 2 mm 处(上升段气门升程 2 mm 处接近气门速度最大的位置,曲轴角度变化最敏感)对应的曲轴转角。由图 8 可知:激光位移传感器的采样频率不变,随着发动机转速升高,气门升程的相位滞后越明显。

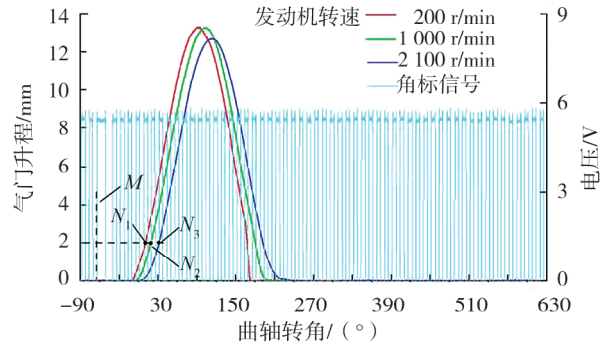


图 8 采样频率为 100 kHz 时的实测气门升程

将激光位移传感器在不同采样频率、不同发动机转速下的气门升程进行数据处理,获取上升段气门升程为 2 mm 处(接近气门速度最大位置)的曲轴转角如图 9 所示。

由图 9 可知:激光位移传感器采样频率保持不变时,发动机转速升高,气门升程上升段 2 mm 处的曲轴转角增大,即气门升程相位滞后越明显;当发动机转速不变,激光位移传感器采样频率降低,气门升程上升段 2 mm 处曲轴转角增大,气门升程相位滞后越明显。因此传感器采样频率对气门升程测量精度有重要影响。传感器采样频率越高,气门升程相位滞后越小,即增大激光位移传感器的采样频率可以提高对气门升程的测量精度。

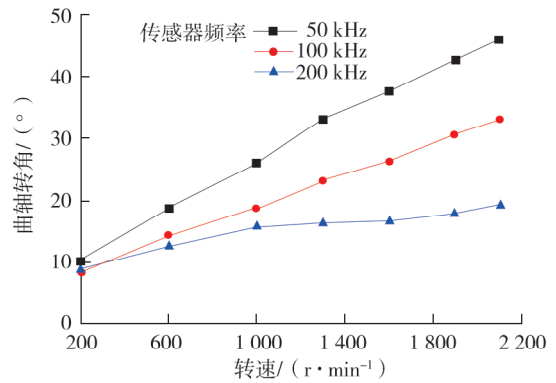


图 9 传感器采样频率对相位滞后的影响

2.3 气门升程数据处理方法

在采集气门升程数据的过程中,激光位移传感器的输出信号容易受到其他信号的干扰,导致采集的气门升程曲线不光滑,存在很多“毛刺”。这些干扰信号对微分求解气门升程的速度、加速度造成较大影响,因此对原始气门升程数据采用滤波、光顺的方式进行处理。

FHVVS 中气门与液压活塞之间不存在气门间隙,因此可以将气门组件和液压活塞作为一个整体进行动力学分析,忽略气门受到的气体阻力,活塞与气门部件在油液压力、弹簧力与阻尼力的作用下做往复直线运动,该运动规律^[13]可表示为:

$$m_j \frac{d^2 H}{dt^2} = pS - (KH + f_0 + c \frac{dH}{dt}), \quad (2)$$

式中: m_j 为液压活塞-气门组件的当量质量, kg; H 为气门行程, m; p 为作用在液压活塞上的高压压力, Pa; S 为液压活塞面积, m^2 ; K 为气门弹簧刚度, N/m ; f_0 为气门弹簧预紧力, N; c 为阻尼系数, $N/(m \cdot s^{-1})$; t 为时间, s。

由于 f_0 、 K 、 m_j 均为定值,阻尼力相对其他力较小,根据式(2)可知:气门加速度的波动主要取决于 p 。气门加速度的波动频率基本与高压压力的波动频率保持一致。以此可以区分杂波信号与气门有效信号,判断低通滤波截止频率是否合适。

发动机转速为 1 600 r/min、不同截止频率对气门升程进行数据处理得到的气门加速度如图 10 所示。由图 10 可知:当截止频率为 5.0 kHz 时,干扰信号较多,无法区分干扰信号与气门振动加速度信号;当截

止频率设置为 0.5 kHz 时,信号出现了失真现象,有效信号被过滤掉;当截止频率为 1.0 kHz 时,此时气门加速度波动频率与高压压力波动频率一致。由此可知,当低通滤波截止频率设置为 1.0 kHz 时,加速度信号滤波效果较好,加速度信号有较好的保真度。

不同转速、不同滤波频率的气门升程、气门加速度与作用在液压活塞上的高压压力如图 11 所示。由图 11 可知:不同发动机转速需要的低通滤波截止频率不同,发动机转速为 800 r/min 时,低通滤波截止频率应采用 2.0 kHz;发动机转速为 1 800 r/min 时,低通滤波截止频率应设置为 890 Hz;发动机转速为 2 000 r/min 时,低通滤波截止频率应设置为 0.8 kHz;即随着转速的提高,采用的低通滤波截止频率应相应降低。

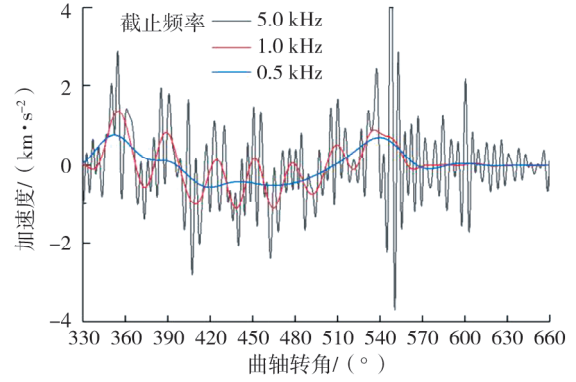


图 10 不同截止频率滤波处理后气门加速度

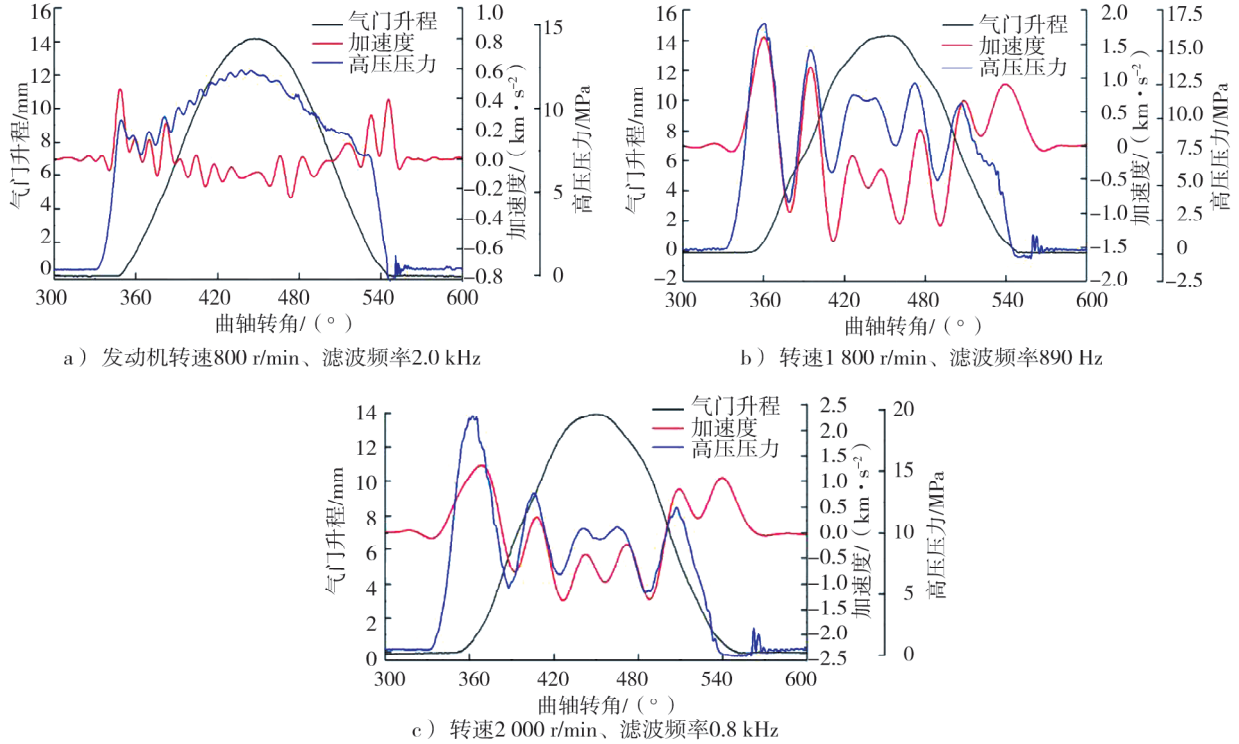


图 11 不同转速、不同滤波频率的气门升程、气门加速度与高压压力

为了使试验数据更加接近实际,对气门升程滤波后进行光顺处理。光顺处理可消除气门升程曲线中一些不合理的波动。因此,在对气门升程处理的程序中采用了五点三次平滑法。光顺后的气门升程的计算式^[14]为:

$$\begin{cases} b_1 = (69a_1 + 4a_2 - 6a_3 + 4a_4 - a_5)/70 \\ b_2 = (2a_1 + 27a_2 + 12a_3 - 8a_4 + 2a_5)/35 \\ b_j = (12a_{j-1} - 3a_{j-2} + 17a_j + 12a_{j+1} - 3a_{j+2})/35, \\ b_{n-1} = (2a_n + 27a_{n-1} + 12a_{n-2} - 8a_{n-3} + a_{n-4})/35 \\ b_n = (69a_n + 4a_{n-1} - 6a_{n-2} + 4a_{n-3} - a_{n-4})/70 \end{cases}, \quad (3)$$

式中: a_i 为测量的原始气门升程; $i=1,2,\dots,n$; n 为试验数据的个数; b_j 为光顺处理后的气门升程, $j=3\sim(n-2)$ 。

光顺处理前、后气门升程如图 12 所示。由图 12 可知:经过光顺处理后,实测升程曲线更为平滑,且无明显失真现象。

3 结论

对搭载 FHVVS 的 6 缸柴油机进行气门运动规律动态测量,分析了发动机转速、传感器动态响应特性以及数据处理方式对气门升程测量精度的影响。为使试验数据更加接近实际,采取了角标信号处理、增大传感器采样频率的测量方法及选择滤波、平顺的数据处理方法。

1) 阻力矩波动导致瞬时转速波动,这种瞬时转速波动在低转速下更加明显。通过角标信号对气门升程进行数据处理,可有效减少由于瞬时转速波动导致的气门升程测量误差。

2) 激光位移传感器的动态特性是影响气门升程测量精度的关键因素。发动机转速增大,导致气门升程相位滞后;增大激光位移传感器采样频率,可以改善此现象。

3) 选择合适的数据处理方式可以提高气门升程测量精度。FHVVS 气门加速度波动频率与作用在液活活塞上的高压压力的波动频率一致,以此可区分干扰信号与气门加速度信号,判断低通滤波截止频率是否合适。不同发动机转速需要的低通滤波截止频率不同,随着发动机转速增大,滤波截止频率应相应减小;采用五点三次平滑法处理气门升程可使数据更加接近实际。

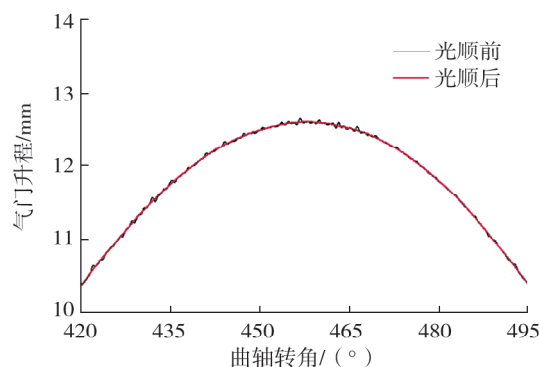


图 12 光顺处理前、后实测气门升程

参考文献:

- [1] 苏万华,张众杰,刘瑞林,等. 车用内燃机技术发展趋势[J]. 中国工程科学,2018,20(1):97-103.
- [2] 李涛. 无节气门汽油机燃烧循环变动的试验研究[D]. 济南:山东大学,2017.
- [3] PETER D, FRANK P, GERD H, et al. Thermodynamic potentials of a fully variable valve actuation system for passenger-car diesel engines[C]//Proceedings of 2010 SAE World Congress. Detroit, USA:SAE International, 2010:11877-11885.
- [4] 吴修江,李智敏,谢宗法,等. 全可变液压气门机构对汽油机泵气损失及机械效率的影响[J]. 内燃机与动力装置,2019,36(6):1-5.
- [5] 魏枫展,张晋群,常英杰,等. 全可变液压气门运动特性及其泵气损失[J]. 内燃机学报,2020,38(1):57-63.
- [6] 闫帅. 全可变液压气门机构改善汽油机燃油经济性的试验研究[D]. 济南:山东大学,2016.
- [7] JESÚS B, SANTIAGO M, RICARDO N, et al. Evaluation of massive exhaust gas recirculation and Miller cycle strategies for mixing-controlled low temperature combustion in a heavy duty diesel engine[J]. Energy,2014,71:355-366.
- [8] YAN B W, WANG H, ZHENG Z Q, et al. The effects of LIVC Miller cycle on the combustion characteristics and thermal efficiency in a stoichiometric operation natural gas engine with EGR[J]. Applied Thermal Engineering,2017,122:439-450.
- [9] 胡治,朱晓阳,方茂文,等. 发动机气门间隙和气门升程在线测量方法研究[J]. 汽车工程,2020,42(10):1434-1439.
- [10] 刘忠民,俞小莉,李建锋,等. 多传感器数据融合技术在气门动态特性试验中的应用[J]. 内燃机学报,2005(3):264-268.
- [11] 李建锋,俞小莉,沈瑜铭,等. 气门动态信号处理方法研究[J]. 内燃机工程,2004(1):35-37.
- [12] CHEN F, CHANG Y J, XIE Z F, et al. Simulation and experimental research of hydraulic pressure and intake valve lift on a fully hydraulic variable valve system for a spark-ignition engine[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018,10(5):1-11.
- [13] 黄玉珍,谢宗法,常英杰,等. 全可变液压气门机构的气门落座特性[J]. 内燃机学报,2017,35(6):523-529.
- [14] 张晋群,李小霞,谢宗法,等. 凸轮驱动式全可变液压气门系统仿真与试验研究[J]. 内燃机工程,2021,42(4):30-37.

(下转第 32 页)