

# 汽油机起动过程的振动

韩立伟<sup>1</sup>,洪伟<sup>1</sup>,苏岩<sup>1</sup>,王炳刚<sup>2</sup>,解方喜<sup>1</sup>

(1. 吉林大学汽车动态模拟国家重点实验室, 长春 130022; 2. 一汽解放汽车有限公司无锡柴油机厂, 江苏无锡 214026)

**摘要:**为减小发动机起动工况的振动对汽车舒适性的影响(这对于应用频繁起动-停机控制策略的汽车来说尤其重要),在一台 Jetta 1.6 L 发动机上测试了发动机起动第一个循环的振动信号,研究了活塞初始位置、冷却液温度、拖动转速对起动过程振动的影响规律。结果表明,当发动机活塞初始位置处在进气门关闭之后接近上止点时,发动机起动振动较小。热机(85℃)起动振动相比冷机(20℃)起动振动略有降低。拖动转速对起动振动影响非常明显,即发动机快速起动时的振动相比原机低速起动的振动小很多。

**关键词:**动力机械工程;汽油机振动;起动过程

**中图分类号:**TK411 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2010)04-0937-05

## Vibration of gasoline engine during start process

HAN Li-wei<sup>1</sup>, HONG Wei<sup>1</sup>, SU Yan<sup>1</sup>, WANG Bing-gang<sup>2</sup>, XIE Fang-xi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Automobile Dynamic Simulation, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Wuxi Diesel Engine Factory of FAW Liberation Co., Ltd., Wuxi 214026, China)

**Abstract:** To reduce the impact of engine vibration during start process on the vehicle ride comfort, which is important in particular when the start-stop control strategy is applied in the engine, the vibration signals of the first cycle during start of engine were measured, and the effects of the initial position of piston, the cooling liquid temperature and the cranking speed on starting vibration were investigated on a Jetta 1.6 L gasoline engine. The results show that when the piston stays initially at the position near the top dead center after the intake valve closing, engine starting vibration is relatively weak. The vibration at warm starting (corresponding cooling liquid temperature 85℃) is weaker than that at cold starting (20℃). The cranking speed makes a notable impact on the starting vibration of the engine, rapid cranking makes much weaker vibration than original basic engine slow cranking does.

**Key words:** power machinery and engineering; gasoline engine; vibration; start process

汽车在起动、怠速、正常行驶和停车等各种工况下良好的平顺性和低噪音是评判现代汽车质量

优劣的重要标志<sup>[1]</sup>。而汽车起动-停止技术(即车辆怠速时熄火,起车时迅速起动)在此方面具有很

收稿日期:2009-06-01.

基金项目:“863”国家高技术研究发展计划项目(2006AA110106).

作者简介:韩立伟(1979-),男,博士研究生.研究方向:内燃机工作过程优化与控制.

E-mail:hanliweiyang@yahoo.com.cn

通信作者:洪伟(1963-),男,教授,博士生导师.研究方向:内燃机工作过程优化与控制. E-mail:hongw@jlu.edu.cn

大的潜力<sup>[2]</sup>。日本有 70 个县市 2004 年开始实施“车辆短时间怠速没有熄火要罚款”等相关法令,加拿大温哥华和一些欧洲国家也有同样的法令,瑞士和荷兰的法规还要求“红灯熄火(等待红灯时熄灭发动机)<sup>[3]</sup>”。起动-停止技术完全节省了怠速时的油耗和排放(汽车怠速时 CO 排放量是其行车状态下的 100 倍),但导致起动工况将会变得更加频繁。于是发动机起动工况振动的研究变得尤为重要。作者在 Jetta 1.6 L 发动机上研究起动振动,分析了振动的影响因素,为起动-停止技术的控制策略提供借鉴。

### 1 试验设备及试验方法

#### 1.1 试验设备

在 Jetta 1.6 L 发动机机体前端支座(右)布置一振动传感器,在发动机前端的一侧安装一台高速电机拖动发动机起动,可以使发动机实现快速起动<sup>[2]</sup>。发动机试验台架布置简图如图 1 所示。发动机主要参数:Jetta 1.6 L 发动机;4 缸直列、水冷、四冲程;缸径×行程为 113 mm×77.4 mm;额定功率为 74 kW(5800 r/min);最大扭矩为 150 N·m(3900 r/min);上止点前 9 °CA 进气门开启,下止点后 36 °CA 进气门关闭;下止点前 38 °CA 排气门开启,上止点后 8 °CA 排气门关闭。采用瑞士奇石乐 Kistler 的 6117 B 缸压传感器采集第一缸缸内压力,采用上海内燃机研究所的 WDF-3 电荷放大器放大缸内压力信号,通过 DSPS V5.0 动态信号实时分析系统采集从起动到怠速这一过程的振动信号和第一缸的缸内压力。

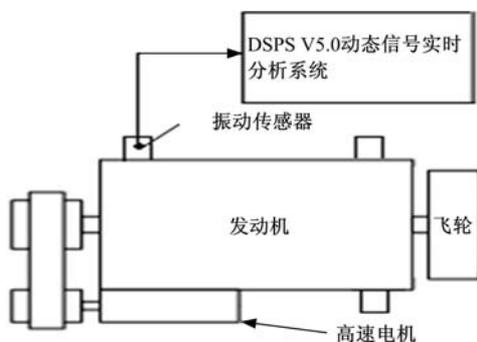


图 1 发动机试验台架布置简图  
Fig.1 Sketch map of engine test bed

#### 1.2 试验方法

水温为 20 °C 时,起动前使发动机第一缸活塞的初始位置分别处于上止点前 180 °CA 和上止点

后 60 °CA 之间的每隔 10 °CA 的一个位置上,起动发动机采集从起动到怠速这一过程的振动信号和第一缸的缸内压力,试验重复 3 次,统计分析活塞初始位置对起动振动的影响。用加热器将水温加热到 85 °C 时,重复以上试验,研究冷却水温度对起动振动的影响。控制水温为 85 °C,使活塞分别处在不同的初始位置上,采用原机起动机(低速)起动和快速电机(高速)起动两种方式起动发动机,研究拖动转速对起动振动的影响。

### 2 理论分析及振动阶段划分

#### 2.1 理论分析

发动机在实际运转中,导致其稳态振动的主要原因是各种周期性的激振力或力矩。对于四缸发动机的起动过程来说,其振动源主要是缸内气体压力和二阶往复惯性力,二者对发动机产生倾覆力矩,传到发动机两侧的支撑上引起振动<sup>[4-5]</sup>(如图 2 所示)。图 2 中缸内气体压力  $F_g$  作用在活塞顶的同时,同样大小但方向相反的力  $-F_g$  作用于气缸盖,故缸内气体压力属于内力,对外界作用只有 2 个力矩,即驱动曲轴旋转的转矩和倾覆力矩  $T_{kg}$ (图中  $F_{cg}$  和  $F'_{cj}$  为倾覆力矩  $T_{kg}$  的力偶),倾覆力矩通过机体传给发动机两侧的支撑,支撑给与相应的支反力  $R_g$  和  $-R_g$ ,  $R_g = T_{kg}/b$ 。往复惯性力  $F_j$  同样对机体产生倾覆力矩  $T_{kj}$ (图中  $F_{cj}$  和  $F'_{cj}$  为倾覆力矩  $T_{kj}$  的力偶),因为  $F_j$  对气缸盖没有作用,所以它不能抵消,是向外表现的自由力,需由支撑承受,其支反力的值  $R_{j1} = F_j/2 + T_{kj}/b$ ,  $R_{j2} = F_j/2 - T_{kj}/b$ 。

根据以上分析,本试验把测点选取在发动机前端一侧的支撑上。此外,在发动机起动过程中,

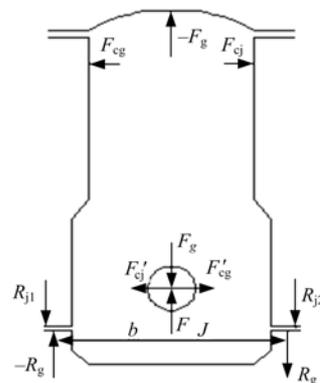


图 2 缸内气体压力和往复惯性力引起的力和力矩  
Fig.2 Force and torque arise from cylinder pressure and reciprocating inertia force

电动机驱动发动机的反作用力也不容忽视,它也会引起发动机起动过程的振动<sup>[6-9]</sup>。

### 2.2 起动过程振动的阶段划分

图 3 为发动机起动过程的阶段划分,A 阶段为起动初始到稳定拖动转速阶段,B 阶段为稳定拖动转速阶段,C 阶段为稳定拖动转速至着火怠速过渡阶段,D 阶段为着火后怠速阶段。图 4 为与图 3 对应的振动阶段划分。其中 A 阶段振动源主要是缸内气体压力产生的倾覆力矩和电动机驱动发动机的反作用力。本文主要从活塞初始位置、发动机冷却水温度和拖动转速对起动时 A 阶段的振动的影响进行研究。

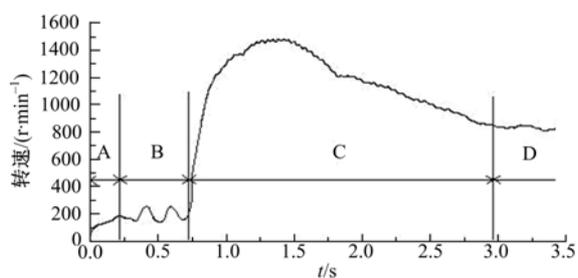


图 3 发动机起动振动的阶段划分

Fig. 3 Stage division of starting vibration during start process

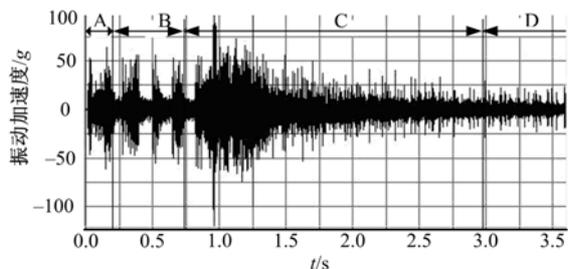


图 4 起动振动加速度时域波形

Fig. 4 Time domain waveform of starting vibration during start process

## 3 试验结果及分析

### 3.1 活塞初始位置对起动振动的影响

图 5 为水温为 20 °C 时不同的活塞初始位置对振动的影响。图中每一个点为起动过程 A 阶段振动加速度绝对值的峰值,并且活塞在每个初始位置上重复试验三次,这样虽然试验的重复性不是很好,但是通过大量的试验,可以发现数据分布具有一定的趋势,即当活塞接近上止点时振动会明显降低,在上止点前 30 °CA 左右时起动振动最小。这是缸内气体压力作用的结果,而缸内气体压力与进气门关闭时刻有一定的关系。图 6 为

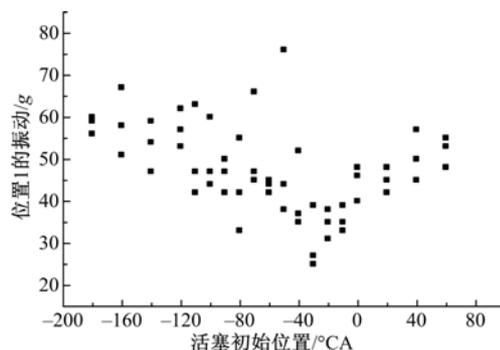


图 5 冷机起动活塞初始位置对振动的影响

Fig. 5 Effect of piston's initial position on vibration under cold start condition

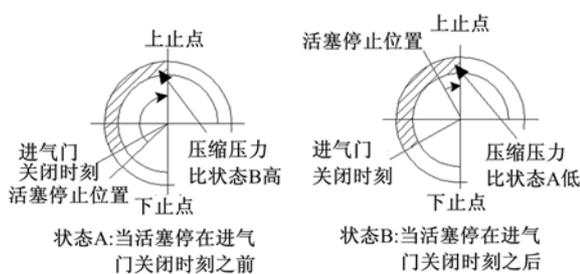


图 6 活塞初始位置与缸内气体压力之间的关系

Fig. 6 Relationship between piston's initial position and cylinder pressure

活塞初始位置与缸内气体压力之间的关系,易知活塞停在进气门关闭时刻之前的压缩压力比停在进气门关闭时刻之后的高,所以最小的振动发生在进气门关闭之后接近上止点的位置。

经过前期仿真计算,发动机起动过程气缸压力对发动机运行阻力矩贡献很大<sup>[10]</sup>。图 7 为根据气缸压力曲线计算的气缸压力对曲轴的阻力矩。从图中可以发现,发动机起动过程气缸压力的阻力矩在一个循环之内随着活塞初始位置接近

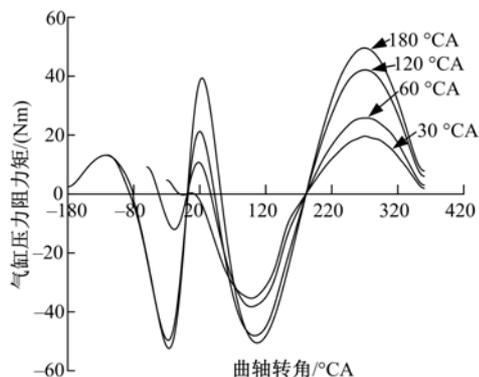


图 7 冷机起动活塞初始位置对振动的影响

Fig. 7 Effect of piston's initial position on vibration under cold start condition

上止点,气缸压力阻力矩随之减小。故最小的振动发生在进气门关闭之后接近上止点的位置,因此可以通过控制活塞的停止位置来减小发动机起动时的振动。

### 3.2 冷却水温度对起动振动的影响

图8为发动机起动机拖动,冷机(水温 20 °C)与热机(水温 85 °C)状态起动时振动的比较。在相同活塞初始位置,热机起动振动较冷机振动略有降低。

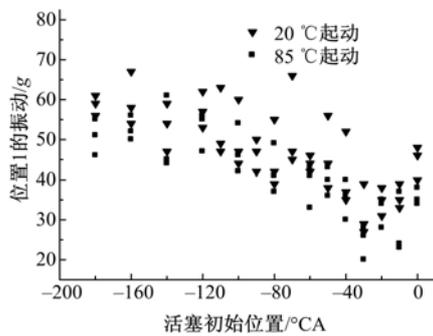


图8 冷机原机起动振动与热机原机起动振动比较  
Fig. 8 Comparison between original cold starting vibration and original heat starting vibration

起动过程中,缸内气体压力、活塞惯性力、活塞环、活塞裙部和气门机构均对曲轴作用阻力矩,经过前期仿真计算,缸内气体压力对发动机运行阻力矩贡献最大,而水温对于气缸压力产生的阻力矩影响不大,只是热机起动时发动机充气效率下降,致使气缸压力产生的阻力矩略有下降。此外,冷机起动时由于机油黏度大、摩擦阻力矩大等因素,发动机起动时阻力矩大,因为发动机的输出扭矩和翻倒力矩大小相等、方向相反,所以翻倒力矩的波动引起发动机支承振动,从而在相同的活塞初始位置冷机起动比热机的起动振动略大。

### 3.3 拖动转速对起动振动的影响

为了研究高转速拖动对起动过程振动的影响规律,安装了高速电机,能够实现快速起动,在0.3 s内可以拖动发动机达到800 r/min,其起动转速变化见图9。图10为水温 85 °C、活塞初始位置不同时,低速起动和高速起动时振动的比较。

由图10可知,当压缩缸活塞初始位置相同时,电机起动的振动均小于原机起动时的振动。活塞初始位置对电动机起动的振动也有一定影响,与原机起动相同,即当活塞停止在进气门关闭之后并且接近上止点时振动会明显降低。

高速起动转速提高很多,扭矩波动减少,转速

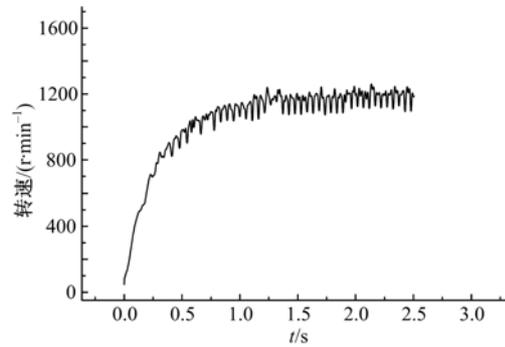


图9 快速电机拖动发动机的转速变化规律  
Fig. 9 Rotation speed of engine with quick motor dragging

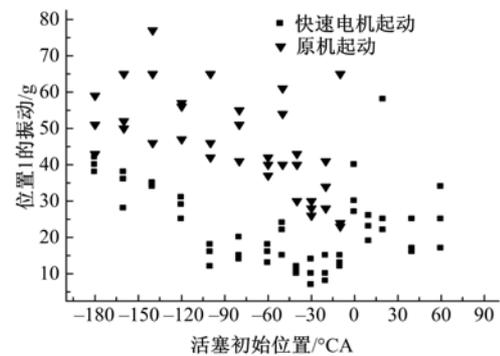


图10 原机起动与高速拖动起动振动的比较  
Fig. 10 Comparison between original starting vibration and quick starting vibration

波动降低使得垂向惯性力减小,所以高速起动振动降低。此外,直流电机在低速运转时,由于定、转子齿相对位置的改变,每个磁极下的气隙磁导也随之改变,引起磁场的脉动,从而使每极下定、转子的磁拉力发生以转子齿频率为周期的变化。当磁拉力的变化频率与定子的固有频率或转子临界转速所对应的频率共振时,电机即产生强烈的磁振动和噪声。高速起动的转速升高率大,在0.3 s内就可以拖动发动机达到怠速转速(800 r/min左右),快速地越过引起发动机共振的固有频率和直流电机在低速运转时的共振区,使起动振动明显降低。故快速电机起动时的振动较小。

## 4 结 论

(1)发动机起动时,活塞初始位置对起动振动有一定的影响。最小的振动发生在进气门关闭之后接近上止点的位置,可以通过控制活塞的停止位置来减小发动机起动时的振动。

(2)在相同活塞初始位置时,热机(85 °C)起动振动较冷机(20 °C)起动振动略有降低。

(3)拖动转速对起动振动的影响很大,在相同活塞初始位置时,高速起动要比原机起动的振动小很多。

#### 参考文献:

- [1] 华春雷,靳晓雄,蔺玉辉,等. 汽车发动机振动主动控制试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(3): 294-297.  
Hua Chun-lei, Jin Xiao-xiong, Lin Yu-hui, et al. Experimental research on active control of automobile engine vibration[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(3): 294-297.
- [2] Bishop John, Nedungadi Ashok, Ostrowski Gregory, et al. An engine start/stop system for improved fuel economy[C]//SAE Paper, 2007-01-1777.
- [3] 贾新光. 应该规定停车熄火[N]. 国际航空报, 2009-01-05.
- [4] 庞剑, 谌刚, 何华. 汽车噪声与振动: 理论与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- [5] Masashi Komada, Takayoshi Yoshioka. Noise and vibration reduction technology in new generation hybrid vehicle development[C]//SAE Paper, 2005-01-2294.
- [6] Yoshioka T, Sugita H. Noise, vibration technology in hybrid vehicle development [C] // SAE Paper, 2001-01-1415.
- [7] Kanai H, Ueda K, Yamaguchi K. Reduction of the engine starting vibration for the parallel hybrid system [C] // SAE Spring Convention Proceedings, 1998.
- [8] Kawabata N, Komada M, Yoshioka T. Noise and vibration reduction technology in the development of hybrid luxury sedan with series/parallel hybrid system [C] // SAE Paper, 2007-01-2232.
- [9] Ito Y, Tomura S, Moriya K. Vibration-reducing motor control for hybrid vehicles. review of toyota [DB/OL]. [2009-04-15]. [http://www.tytlabs.co.jp/japanese/review/rev402pdf/402\\_037ito.pdf](http://www.tytlabs.co.jp/japanese/review/rev402pdf/402_037ito.pdf).
- [10] 王炳刚. 汽油机直接起动停止过程平顺性研究[D]. 长春: 吉林大学汽车工程学院, 2009.  
Wang Bing-gang. Study on smoothness of gasoline engine direct start-stop process [D]. Changchun: Jilin University, College of Automotive Engineering, 2009.