

基于飞轮加速度的缸间差异和循环差异研究*

甄龙信, 安子军, 滕晓雷

(燕山大学车辆与能源学院 秦皇岛, 066004)

摘要 针对发动机缸间差异和循环差异缺少定量计算的研究现状,利用 Matlab 软件对发动机怠速时的飞轮原始数据进行处理,定量计算内燃机飞轮的最大角速度缸间差异参数、循环差异参数和抖振参数(lowest normalized value,简称 LNV),分析其与相应气缸压力参数之间的相关性及随内燃机转速和载荷的变化规律。分析结果表明,内燃机最大角速度缸间差异、循环差异和 LNV 值分别与相应的气缸压力参数高度线性正相关;随着怠速升高,缸间差异减小,循环差异基本保持不变;起初随着怠速升高,内燃机的抖振变小,当怠速升高到一定程度,抖振基本保持不变。随着内燃机载荷的增加,缸间差异、循环差异和抖振都减小,但循环差异比缸间差异受载荷影响更大。

关键词 发动机;飞轮;加速度;缸间差异;循环差异;抖振

中图分类号 TH113.1

引言

目前,分析内燃机燃烧稳定性的基本方法是通过测量分析各缸的燃烧压力实现的^[1,2]。测定气缸的压力是一个非常复杂的过程,需要很长的准备时间和较多测试仪器,这就决定了该方法只能在特定的测试场所才能进行,限制了其在其它场所中的应用,例如现场测试。并且这种方法需要在气缸内安装传感器,可能会影响发动机的燃烧过程。

因此,基于飞轮角速度和角加速度参数评价发动机燃烧稳定性的分析方法得到了国外汽车厂商和学者的重视,并进行了相应的研究。这种方法不需要直接测量气缸的压力,不影响发动机的燃烧过程,测试准备时间短,测试成本低。Teng^[3]论述了使用曲轴角加速度测量发动机怠速时的燃烧稳定性的方法。Hartwig 等^[4]研究了飞轮加速度、速度变化量与有效平均指示压力、气缸最大压力、压力升率之间的关系。Chen 等^[5]研究了用曲轴的角速度波动指示发动机的有效平均指示压力的方法,并在发动机怠速稳定性控制中得到应用。Teng^[6]研究了利用发动机的校准参数来计算曲轴角加速度的方法。可见,国外学者主要针对发动机怠速的 RMS 角加速度、最大角加速度及其标准偏差、最大角加速度变化

率等参数与对应的气缸压力参数之间的相关性进行了分析,没有对角加速度 LNV 参数和气缸压力 LNV 参数之间的相关性进行分析。而在国内主要集中在对曲轴角速度的研究和应用上^[7-8]。

评价发动机燃烧稳定性的两个最主要参数是平均有效指示压力(indicated mean effective pressure,简称 IMEP)和平均有效指示压力标准偏差(standard deviation of indicated mean effective pressure,简称 SDIMEP)。平均有效指示压力标准偏差包括两个方面:气缸压力缸间差异和气缸压力循环差异。前人对缸间差异和循环差异进行研究的文献都没有对缸间差异和循环差异做定量计算,主要通过平均有效指示压力标准偏差或者平均有效指示压力变动率来评价循环差异,通过比较各缸的平均有效指示压力的大小来评价缸间差异,因此也没有对角加速度缸间差异以及角加速度循环间差异与相应的气缸压力参数之间的相关性进行分析。

笔者以某 8 缸发动机为例,在前人研究工作的基础上,采用 Matlab 软件对发动机怠速时的飞轮原始数据进行处理,定量计算飞轮的最大角速度缸间差异、循环差异和 LNV 值等统计参数,分析这些参数与相应的气缸压力参数之间的相关性及其随内燃机转速和载荷的变化情况,对利用飞轮数据评价发动机的燃烧稳定性的方法做进一步的补充。

* 河北省科学技术研究与发展计划资助项目(10215602D);国家自然科学基金资助项目(51275442)
收稿日期:2012-11-18;修回日期:2013-05-21

1 角加速度统计参数计算

根据气缸压力参数,文中分别定义了角加速度缸间差异、循环差异和 LNV 参数。

1.1 角加速度缸间差异参数

角加速度缸间差异参数表示多缸发动机不同气缸间的角加速度的差异。将某缸做功期间曲轴转过的角度称为该缸的主导期间。

定义角加速度缸间差异参数需要最大角加速度,首先定义各缸主导期间的最大角加速度为

$$\alpha_{\max l} = \frac{1}{N_c} \sum_{c=1}^{N_c} \alpha_{\max lc} \quad (l=1,2,\dots,8) \quad (1)$$

其中: $\alpha_{\max l}$ 为第 l 缸的最大角加速度统计参数; N_c 为工作循环数; $\alpha_{\max lc}$ 为第 l 缸在第 c 个工作循环的最大角加速度。

发动机总体最大角加速度表示所有气缸最大角加速度的平均值为

$$\alpha_{\max} = \frac{1}{8} \sum_{l=1}^8 \alpha_{\max l} \quad (2)$$

根据式(1)和(2)定义角加速度缸间差异参数为

$$S_g = \sqrt{\frac{1}{8} \sum_{l=1}^8 (\alpha_{\max l} - \alpha_{\max})^2} \quad (3)$$

1.2 角加速度循环差异参数

角加速度循环差异参数表示发动机不同工作循环间曲轴角加速度的差异。

首先定义各缸最大角加速度的标准偏差为

$$S_{\max l} = \sqrt{\frac{1}{N_c} \sum_{c=1}^{N_c} (\alpha_{\max lc} - \alpha_{\max l})^2} \quad (4)$$

其中: $S_{\max l}$ 表示各缸的循环差异。

因此根据式(4)定义角加速度循环间差异参数为

$$S_x = \frac{1}{8} \sum_{l=1}^8 S_{\max l} \quad (5)$$

1.3 角加速度标准偏差

角加速度标准偏差表示内燃机的总体燃烧稳定性,由角加速度缸间差异和角加速度循环差异表示如下

$$S = \sqrt{S_g^2 + S_x^2} \quad (6)$$

式(6)和其他文献的计算角加速度标准偏差的方法不同。

1.4 角加速度 LNV 参数

LNV 参数用一段时间内某一参数的最小值和平均值的比值来表示。对于内燃机,该参数用来表述发动机的抖振现象。

最大角加速度 LNV 值用如下公式表示

$$LNV_{\max} = \frac{\min(\alpha_{\max c})}{\alpha_{\max}} \times 100\% \quad (7)$$

其中: $\alpha_{\max c}$ 为 $\alpha_{\max lc}$ 的集合; $\min(\alpha_{\max c})$ 为所有工作循环中最大角加速度的最小值。

根据文献[6]的数据,当 LNV 值小于 75% 时,车辆乘员将会感觉到抖振,并且 LNV 值越小,抖振越严重。

2 角加速度和气缸压力参数相关分析

现利用文献[9]的方法分析实验得到的某发动机多个怠速条件下的飞轮数据,用上述方法计算飞轮角加速度缸间差异、循环差异和 LNV 等统计参数,将角加速度统计参数与实测的发动机相应的气缸压力参数进行相关分析。

实验对象为安装在某轿车上的 6.2 L 四冲程 8 缸发动机,其点火顺序为 1-5-4-8-6-3-7-2,该车配备自动变速器。实验条件分为自动变速器啮合和空挡 2 种,自动变速器啮合时踩住刹车以防车辆移动,同时增加发动机的载荷;每种实验条件下,发动机的怠速依次设定为 500, 525, 550, 575, 600, 625, 650, 675, 700, 725, 750, 800, 900 及 1 000 r/min。实验在实验室内的整车实验台架上进行,实验过程中,每个转速下的飞轮数据和气缸压力数据分别通过电磁传感器和压力传感器同时进行采集,以保证飞轮数据和气缸压力数据的同步性。

对应的气缸压力参数利用和角加速度参数相同的方法计算,每个统计参数的计算选取 300 个内燃机循环。

角加速度缸间差异参数和 IMEP 缸间差异参数的相关分析结果如图 1 所示。角加速度循环差异参数和 IMEP 循环差异参数的相关分析结果如图 2 所示。角加速度标准偏差和 SDIMEP 的相关性在文献[3]中做过分析,但文中的计算方法不同,因此也对这组参数进行分析,相关分析结果如图 3 所示。角加速度 LNV 参数和平均有效指示压力 LNV 参数的相关分析结果如图 4 所示。

在图 1~4 中,点表示分别以压力参数和角加

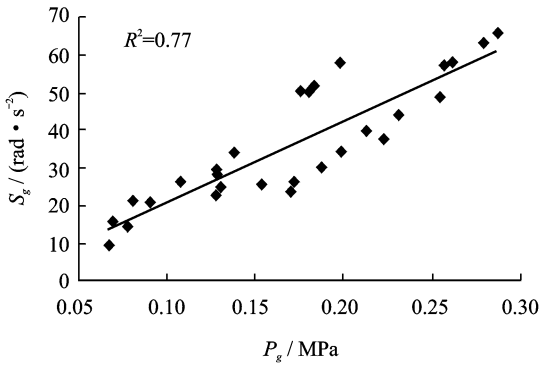


图 1 角加速度缸间差异和 IMEP 缸间差异相关性
Fig. 1 The correlation between cylinder to cylinder variation of acceleration and that of IMEP

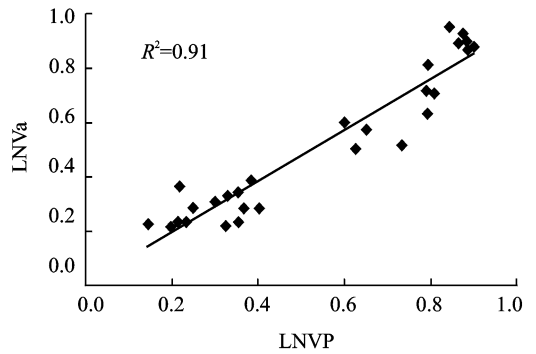


图 4 角加速度 LNV 和 IMEP LNV 相关性
Fig. 4 The correlation between LNV of angular acceleration and that of IMEP

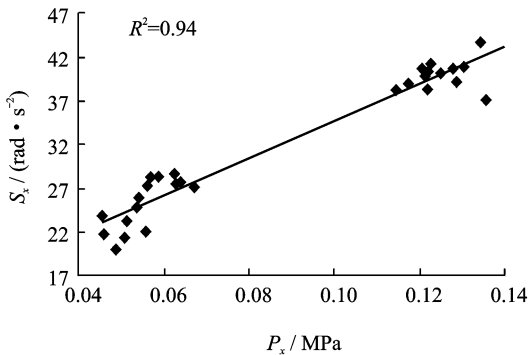


图 2 角加速度循环差异和 IMEP 循环差异相关性
Fig. 2 The correlation between cycle to cycle variation of acceleration and that of IMEP

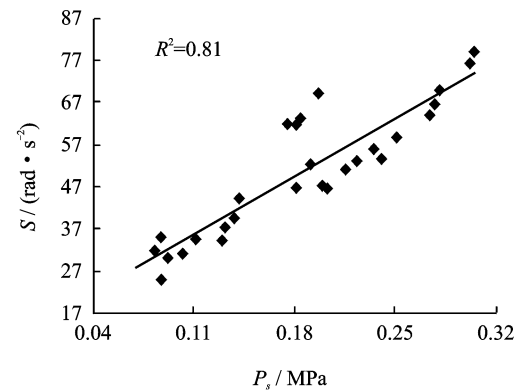


图 3 角加速度标准偏差和 SDIMEP 相关性
Fig. 3 The correlation between standard deviation of acceleration and SDIMEP

高度线性相关。

从图 1~4 可知,角加速度缸间差异和 IMEP 缸间差异之间的决定系数 $R^2 = 0.77 (R = 0.88)$,角加速度循环差异和 IMEP 循环差异之间的决定系数 $R^2 = 0.94 (R = 0.97)$,角加速度标准偏差和 SDIMEP 之间的决定系数 $R^2 = 0.81 (R = 0.90)$,角加速度 LNV 参数和平均有效指示压力 LNV 参数之间的决定系数为 $R^2 = 0.91 (R = 0.95)$ 。以上 4 组参数之间都为高度线性正相关,说明所研究的压力参数与对应的角加速度参数具有几乎相同的变化趋势,加速度参数的变化规律可以反映压力参数的变化规律。因此,实际应用中可以利用角加速度缸间差异参数、角加速度循环差异参数和角加速度 LNV 参数分别代替相应的压力参数进行内燃机燃烧稳定性分析。

3 角加速度参数随转速和载荷的变化

本节研究内燃机的缸间差异、循环差异以及 LNV 参数随内燃机的载荷与转速的变化关系,这是全面分析内燃机燃烧稳定性的基础。

角加速度缸间差异、循环差异和 LNV 参数随内燃机转速变化的曲线分别如图 5~图 7 所示,图中画出了自动变速器空档和自动变速器啮合两种工况的曲线。图中的曲线存在局部波动,这是由于各种不确定干扰因素所致,文中只分析曲线的总体趋势。从图 5 中可以看到,无论是自动变速器空档,还是自动变速器啮合,随着内燃机转速的升高,缸间差异曲线的总体趋势下降,说明随着内燃机转速的升高缸间差异总体趋势减小。

速度参数为横坐标和纵坐标的数据,直线由压力参数和角加速度参数经相关分析拟合而成,表示两者之间的线性关系, R^2 为相关分析得到的决定系数。根据线性相关理论,当 $|R| > 0.8$ 时,两变量之间为

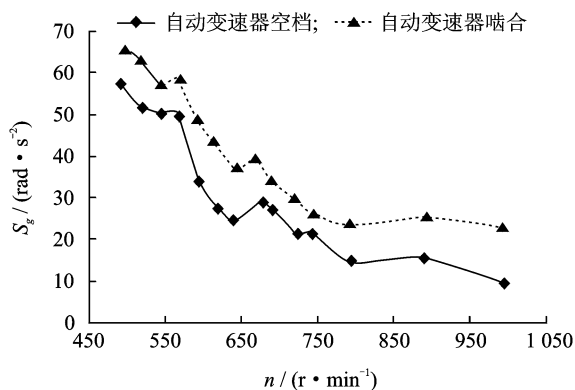


图5 角加速度缸间差异随转速变化

Fig. 5 The variation of cylinder to cylinder variation of acceleration with rotating speed

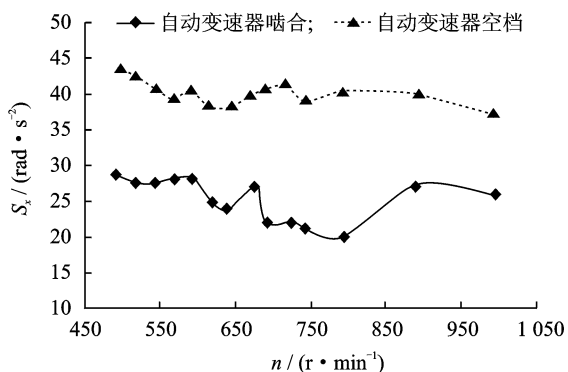


图6 角加速度循环差异随转速变化

Fig. 6 The variation of cycle to cycle variation of acceleration with rotating speed

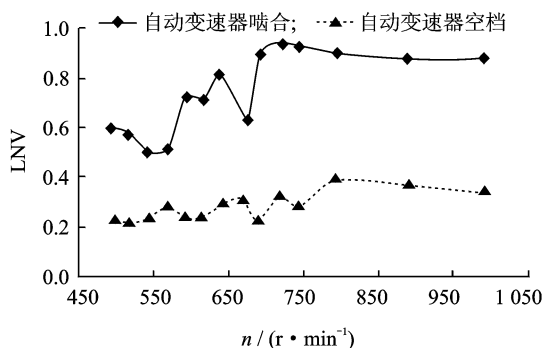


图7 角加速度 LNV 随转速变化

Fig. 7 The variation of LNV of acceleration with rotating speed

从图6可以看到,无论是自动变速器空档,还是自动变速器啮合,随着内燃机转速的升高,循环差异虽然有波动,但总体趋势接近直线,说明随内燃机转

速的升高,循环差异的总体趋势基本保持不变。

综合分析图5和图6可知,对于缸间差异和循环差异,自动变速器啮合工况的曲线都在自动变速器空档工况曲线的下方,说明随着内燃机载荷的增加缸间差异和循环差异都减小;经过统计分析,从自动变速器空档工况到自动变速器啮合工况,角加速度缸间差异参数减小了24.6%,角加速度循环差异参数减小了36.8.6%,说明载荷对缸间差异和循环差异影响很大,且循环差异受载荷影响更大。

从图7可以看到,无论是自动变速器空档,还是自动变速器啮合,在前半段(对于自动变速器啮合分界转速为700 r·min⁻¹左右,对于自动变速器空档分界转速为800 r·min⁻¹左右)随着内燃机转速的升高,LNV参数变大,说明内燃机抖振减弱;在后半段,随着内燃机转速的升高,LNV参数基本不变,说明内燃机抖振状况基本不变。

对于LNV参数,自动变速器啮合工况的曲线在自动变速器空档工况曲线的上方,说明随着载荷的增加,内燃机的抖动状况变好。

根据文献[3]的研究,缸间差异主要与发动机的设计参数和制造缺陷有关,循环差异主要和发动机的调校参数有关。对缸间差异和循环差异进行定量计算,分析其与内燃机转速和载荷之间的关系,可以判断燃烧稳定性问题是由缸间差异引起,还是由循环差异引起,进而可以分析引起燃烧稳定性问题的原因是发动机的设计参数和制造缺陷,还是调校参数。

4 结论

1) 内燃机的角加速度缸间差异和平均有效指示压力缸间差异、角加速度循环差异和平均有效指示压力循环差异以及角加速度LNV值和平均有效指示压力LNV值三组统计参数之间都为高度线性正相关。

2) 当其他条件不变时,随着内燃机怠速的升高,缸间差异减小,循环差异基本保持不变;当内燃机怠速很低时,随着转速的升高,内燃机的抖振变小,当转速升高到一定程度,内燃机抖振状况基本保持不变。

3) 在其他条件不变时,随着内燃机载荷的增加,内燃机的缸间差异、循环差异和抖振都减小,但循环差异比缸间差异受载荷影响更大。

参 考 文 献

- [1] 李兴虎,徐向阳,小栗康文,等. 多缸汽油机气缸压力的缸间差异研究[J]. 内燃机学报,2004,22(2):142-149.
Li Xinghu, Xu Xiangyang, OGURI Yasufumi, et al. Study on differences of cylinder-to-cylinder pressure in multi-cylinder gasoline engine [J]. Transactions of Csice, 2004, 22(2): 142-149. (in Chinese)
- [2] 罗福强,刘浩龙,汤东,等. 多缸柴油机燃烧过程缸间差异统计分析[J]. 农业机械学报,2006,37(10):19-22.
Luo Fuqiang, Liu Haolong, Tang Dong, et al. Analysis of cylinder to cylinder variation of combustion process of DI diesel engine by statistics method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 19-22. (in Chinese)
- [3] Teng C. Evaluation of idle combustion stability using flywheel acceleration[EB/OL]. (2003-05-05) [2012-11-16]. <http://papers.sae.org/2003-01-1673/>.
- [4] Hartwig M, Via J, Govindswamy K, et al. Evaluation of combustion parameters using engine speed fluctuation measurements[EB/OL]. (2005-05-16) [2012-11-16]. <http://papers.sae.org/2005-01-2533/>.
- [5] Chen X, Roskilly M. Crank angular velocity based method for engine IMEP measurement for idle quality investigation and adptive ignition time trimming to improve idle quality[EB/OL]. (1999-03-01) [2012-11-16]. <http://papers.sae.org/1999-01-0855/>.
- [6] Teng C. Engine idle combustion stability evaluation using calibration parameters [EB/OL]. (2005-05-16) [2012-11-16]. <http://papers.sae.org/2005-01-2461/>.
- [7] 苏铁熊,张浅秋. 利用实测发动机瞬态转速波动诊断单缸熄火[J]. 车辆与动力技术,2006(4):40-43.
Su Tiexiong, Zhang Qianqiu. Diagnosis of single cylinder misfire using the transient speed fluctuation of crankshaft[J]. Vehicle & Power Technology, 2006 (4):40-43. (in Chinese)
- [8] 谢永乐,谢三山. 多缸发动机各缸工作不均匀性分析[J]. 四川大学学报,2000,32(4):97-100.
Xie Yongle, Xie Sanshan. Operating characteristic of uniformity for multi-cylinder engine[J]. Journal of Sichuan University, 2000, 32(4): 97-100. (in Chinese)
- [9] Zhen Longxin, An Zijun, Li Qiang. Calculate engine crankshaft angular acceleration based on original flywheel data [C]//2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Piscataway, NJ, USA: IEEE Computer Society Publication, 2010: 3141-3144.



第一作者简介:甄龙信,男,1971年2月生,博士后、副教授、硕士生导师。主要研究方向为车辆振动与噪声、车辆节能等。曾发表《基于飞轮转速及其波动的气缸 IMEP 估计模型》(《中国机械工程》2013年第24卷第9期)等论文。
E-mail: zhen_longxin@ysu.edu.cn

通信作者简介:安子军,男,1960年2月生,博士、教授。主要研究方向为精密机械传动理论、控制技术及振动分析。
E-mail: zjan@ysu.edu.cn